elbé Technologies SARL
2, rue Alphonse Matter
88100 Saint-Dié-des Vosges

Tél.: 06.10.22.71.23
e-mail: contact@elbe-technologies.fr

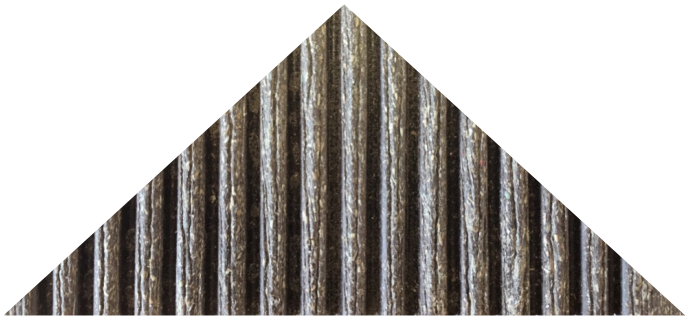
RCS Epinal
Siret : 511 490 146 000 20
TVAI : FR96 511 490 146

Rapport final

Valorisation matière du bois issu du mobilier professionnel en bois composite

Etude selon l'offre acceptée: PR1810-0025

DOCUMENT CONFIDENTIEL



VALDELIA
Mme Florence De MENGIN FONDRAGON
93 rue du Lac, 31670 Labège

Date du document : 05 août 2019

Rédacteur : Laurent BEDEL, Ph.D.

1. Contexte 2

2. Travail réalisé 2

2.1. Phase 1 : Caractérisation et préparation de la matière bois 2

2.2. Phase 2 : Formulation du composite et essai de production 8

2.3. Phase 2 : Caractérisation du compound 13

2.3.1. Conditions opératoires 13

2.3.2. Résultats 14

2.3.3. Analyse 18

2.4. Phase 2 : essais de mise en œuvre sur lignes industrielles 19

2.4.1. Rotomoulage 19

2.4.2. Injection moulage 23

2.4.3. Extrusion 26

2.5. Phase 3 : Tests et mesures des caractéristiques des produits finis 33

2.5.1. Mesure de la densité 33

2.5.2. Flexion 3 points 34

2.5.2.1. Présentation des essais flexion 3 points 34

2.5.2.1. Présentation des échantillons 36

2.5.2.1. Présentation des résultats en flexion 37

2.5.3. Résistance à l'humidité/gonflement et absorption d'eau pour le profil de lame de terrasse alvéolaire 37

2.5.3.1. Présentation de l'essai de résistance à l'humidité : gonflement et absorption d'eau 37

2.5.3.2. Présentation des résultats : gonflement et absorption d'eau 38

2.5.4. Caractérisation de la stabilité dimensionnelle pour un profil de lame de terrasse 41

2.5.4.1. Présentation de l'essai 41

2.5.4.2. Présentation des résultats 41

2.5.5. Caractérisation de la résistance aux termites souterrains 43

2.6. Phase 4 : Analyses 44

2.6.1. Propriétés physico-chimiques 44

2.6.2. Etude économique 45

2.6.3. Aspects environnementaux 47

3. Conclusions 48

1. Contexte

Elbe technologies a travaillé sur le projet Profidea pour lequel la valorisation des déchets bois ex-ameublement (DEA) a été étudiée. Dans ce projet, le focus a été mis sur la dépollution de la ressource DEA (diminution du taux d'azote) et diverses voies de valorisation des matériaux « dépollués » ont été étudiées dont la filière bois composite.

D'autre part, Valdelia a fait réaliser une étude d'opportunité de recyclage des déchets d'ameublement à la Guadeloupe. Cette étude a mis en avant le potentiel économique de produits en bois composites (WPC), notamment dans la filière extrusion à destination des secteurs du BTP et éventuellement de cuves rotomoulées.

Afin de pouvoir inciter des industriels locaux à investir dans une filière bois composite issus de la valorisation des déchets d'ameublement (panneaux de particules et mdf), il est important de pouvoir leur présenter des produits « démonstrateurs » réalisés de façon industrielle afin de pouvoir appréhender leur performances au regard de produits conventionnels ainsi que leur rentabilité.

Dans ce contexte, Valdelia a confié à elbé technologie la réalisation d'une étude de prototypage de composites WPC à base de DEA mis en forme par extrusion moulage et rotomoulage (moulage rotationnel).

Ce rapport final reprend les rapports techniques précédents (#1 et #2) et les complète avec les données économiques, les caractérisations des produits extrudés et la comparaison de ces dernières avec des productions industrielles commerciales.

2. Travail réalisé

2.1. Phase 1 : Caractérisation et préparation de la matière bois

Valdelia a fourni, via la société Nantet, 4 big-bags de déchets de bois broyé grossièrement, prélevés directement de ses centres de collecte, sans sélection préalable pour être les plus représentatifs possible des gisements disponibles.

Figure 1 : Bois DEA déchiqueté fourni via la société Nantet

Le cahier des charges était : broyage de l'ordre du centimètre, taux d'humidité de 10-12% et exempt de métal.

La Figure 1 présente une photo représentative de l'aspect des DEA fournis.

Sur ce matériau nous avons mesuré la densité apparente, le taux d'humidité et la distribution granulométrique.

Le taux d'humidité mesuré est de **15,91 %**
La densité apparente mesurée est de **214 g/L**

La distribution massique est portée dans le Tableau 1et la Figure 2. Le diamètre médian **D50 se situe vers 2mm.**

% par fraction	*mm*	*% Accumulés*
1,1 %		
3,0 %	<10,0	**98,9 %**
4,8 %	<8,0	**95,9 %**
5,9 %	<6,3	**91,1 %**
14,5 %	<5,0	**85,3 %**
19,1 %	<3,15	**70,8 %**
27,8 %	<2,0	**51,7 %**
17,2 %	<1,0	**23,9 %**
6,7 %	<0,5	**6,7 %**

Tableau 1 : répartition des fractions massiques en fonction des tailles de particules du DEA déchiqueté

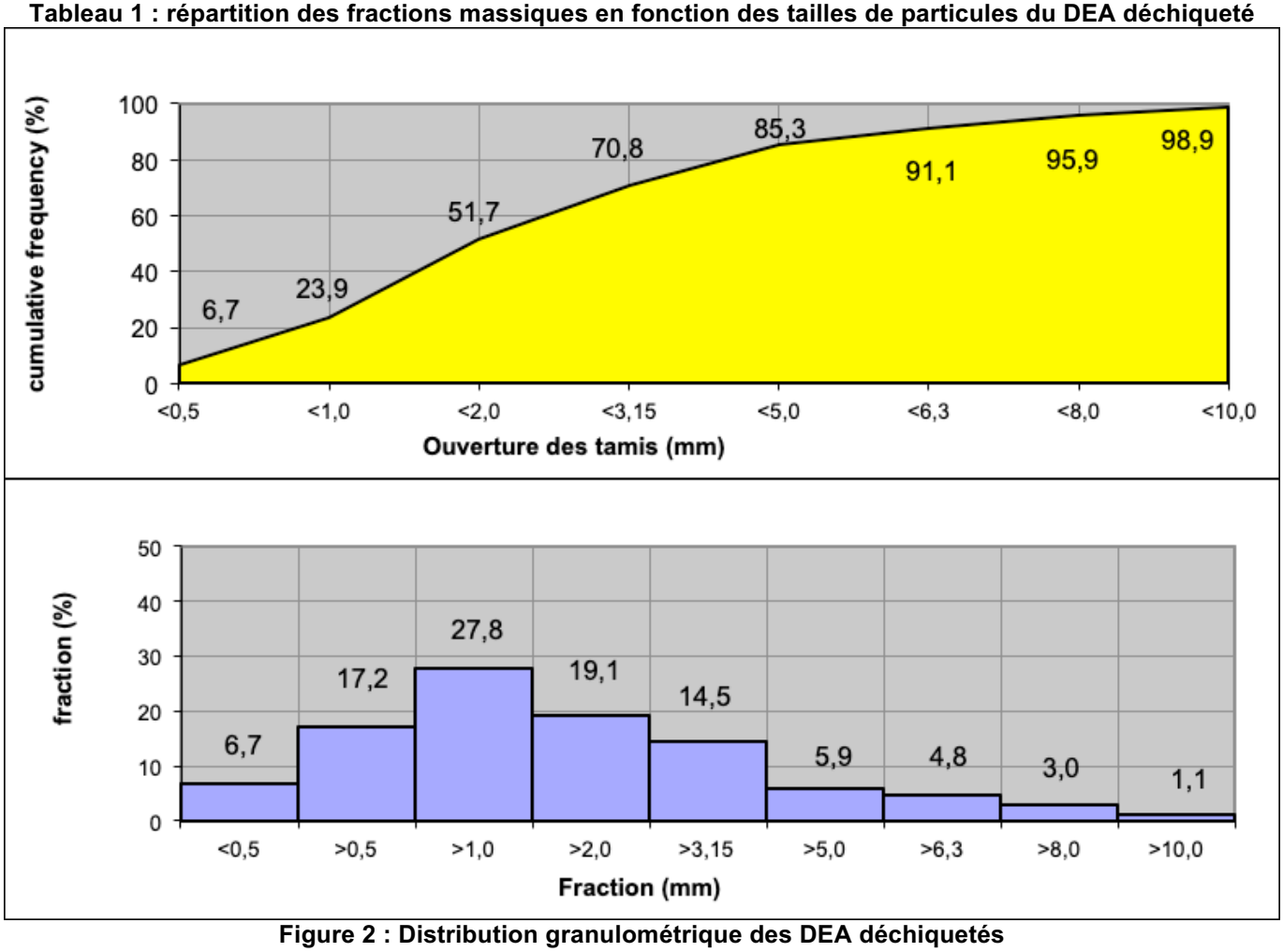


Figure 2 : Distribution granulométrique des DEA déchiquetés

Le bois ainsi caractérisé, a été micronisé à l'aide d'un broyeur à impact de type Pallmann PSKM_8_460.

Figure 3 : Broyeur Pallmann PSKM_8_460

Le bois introduit dans le broyeur est projeté par le flux d'air contre les parois latérales dotées de rainures (Figure 3). Le choc des particules de bois contre ces rainures induit leur éclatement et, par conséquent, leur réduction de taille. La sélection de la taille désirée est obtenue au moyen de grilles annulaires entravant la sortie de la ligne de broyage.

Figure 4 : Chargement et dispositif d'alimentation du broyeur PSKM

Le bois est transvasé des big-bags au broyeur via une unité de transfert régulant le débit d'introduction par un jeu de vis sans fin (Figure 4). Le flux de bois à broyer est alors déversé en continu dans la trémie d'alimentation du broyeur.

Bien que nous ayons doté la ligne de broyage de plaques aimantées pour piéger d'éventuels corps métalliques, alors que le bois DEA fourni était réputé exempt de métal, certaines pièces en métal sont toutefois passées dans le broyeur (Figure 5). Pour poursuivre les essais nous avons dû procéder à un tri manuel supplémentaire en amont de l'introduction dans le broyeur, ce qui a ralenti très fortement le déroulement des essais.

Figure 5 : Exemples de pièces métalliques trouvées sur les plaques aimantées du broyeur (à G) et lors du tri manuel (à D)

En cas d'industrialisation de cette voie de valorisation des DEA, l'expurgation de tout métal sera crucial : nous conseillerons de doter la ligne de déchiquetage de trains d'aimants supplémentaires et veiller à la présence de visserie en inox (non magnétique).

Nous avons également constaté la présence d'une « poussière magnétique » venant s'agglutiner sur la surface des aimants. Cette poussière réduit fortement l'efficacité des aimants (écrantage magnétique). Il serait judicieux de vérifier sur l'installation de déchiquetage si une telle poussière est présente pour expliquer le défaut d'élimination des corps métalliques.

Le broyat a été récupéré en sacs au lancement de l'essai, puis directement en big-bags (Figure 6).

Figure 6 : Dispositif de récupération du bois micronisé en sac (à G) puis en Big-bag (à D)

Sur ce matériau broyé nous avons mesuré la densité apparente, le taux d'humidité et la distribution granulométrique.

Le taux d'humidité mesuré est de **13,67 %**
La densité apparente mesurée est de **213 g/L**

La distribution massique est portée dans le Tableau 2 et la Figure 7. Le diamètre médian **D50 se situe vers 400 µm.**

Le débit moyen mesuré lors de cet essai était de **552 kg/h** pour un débit théorique de 690 kg/h.

% par fraction	*mm*	*% Accumulés*
0,0 %		
1,0 %	<1,5	**100,0 %**
7,0 %	<1,0	**99,0 %**
13,0 %	<0,8	**92,0 %**
15,0 %	<0,6	**79,0 %**
12,0 %	<0,5	**64,0 %**
16,0 %	<0,4	**52,0 %**
15,0 %	<0,3	**36,0 %**
11,0 %	<0,2	**21,0 %**
5,0 %	<0,1	**10,0 %**
5,0 %	<0,063	**5,0 %**

Tableau 2 : répartition des fractions massiques en fonction des tailles de particules du DEA micronisé

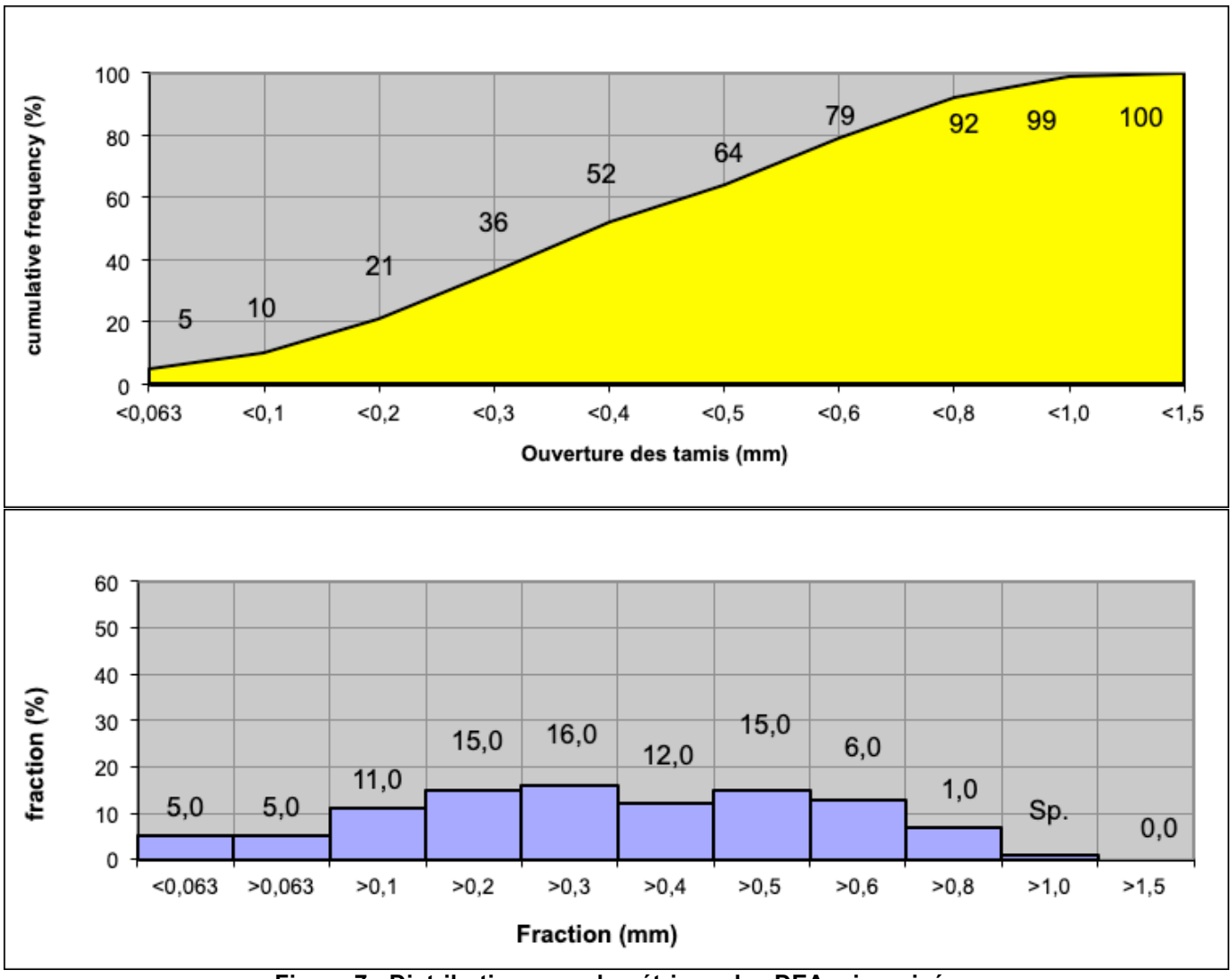


Figure 7 : Distribution granulométrique des DEA micronisés

La distribution granulométrique est large, allant jusque 800 µm, avec une D50 autour de 400 µm. Nous aurions pu réduire la granulométrie en réduisant les ouvertures des grilles du broyeur. Toutefois, une telle réduction aurait conduit à une augmentation significative des particules les plus fines causant un

risque potentiel pour la santé des opérateurs, donc impliquant, le cas échéant, une unité de filtration de l'air plus couteuse, et, surtout, un risque d'explosivité accru par la formation d'atmosphère explosible. Là encore, la protection ATEX de l'installation résulterait en un surcoût important, nous semblant incompatible, à ce stade de connaissance, avec la production économiquement viable d'un bois composite.
Hormis les difficultés rencontrées par la présence de métal dans les DEA déchiquetés, le broyage par impact se révèle parfaitement adapté.

2.2. *Phase 2 : Formulation du composite et essai de production*

Disposant de bois DEA micronisé, nous avons procédé à son compoundage avec des matières plastiques pour réaliser des bois composites.

Afin de pouvoir traiter directement un mélange de polymère avec la farine de bois réalisée, nous avons pris le parti d'utiliser un procédé de compoundage à basse température (env. 100°C), l'énergie nécessaire à la fusion du plastique étant apportée par voie mécanique et non pas thermique. La farine de bois présentant une densité très faible (213 g/L), elle constitue un excellent isolant thermique. Le compoundage au moyen d'une extrudeuse, apportant donc l'énergie nécessaire à la fusion des polymères essentiellement par le biais d'un fourreau chauffant, serait très énergivore (ou alors il faudrait disposer d'une ligne spécifique (introduction du bois par vis gaveuse après la fusion des autres composants).

Nous avons donc utilisé une unité industrielle de type Palltruder PSV250 (Figure 8) dotée d'un dispositif de dosage pondéral 3 voies (Figure 9).

Figure 8 : Unité de compoundage Palltruder 250

Figure 9 : Dispositif de dosage pondéral 3 voies (Colortronic) et système de commande

En plus des deux grades de matériaux destinés à l'extrusion moulage et au rotomoulage, nous avons réalisé deux formulations supplémentaires destinées à l'injection moulage, secteur qui, à nos yeux, présente un débouché important.

Référence formulation	Taux de bois DEA micronisé	Nature et taux de résine plastique	Lubrifiant	Additif
PE60-4	60%	PEHD MFI4, 31%	TPW113, 4%	Bondyram 5108, 5%
PE20-4	20%	PEHD MFI4, 71%	TPW113, 4%	Bondyram 5108, 5%
PP40-100	40%	PP MFI100, 51%	TPW113, 4%	Bondyram 1001, 5%
PP40-55	40%	PP MFI55, 51%	TPW113, 4%	Bondyram 1001, 5%

Tableau 3 : formulations réalisées

Le Tableau 5 résume les formulations ayant pu être produites. Le lubrifiant retenu, le Struktol TPW113, est un mélange d'esters d'acides gras présentant une faible polarité, ce choix est motivé par le recours à un agent de couplage comme additif, destiné à améliorer les performances mécaniques et limiter la reprise d'humidité future du composite. L'agent de couplage est du polyéthylène (5108) ou du polypropylène (1001) rendus polaires par greffage d'anhydride maléique.

Les premiers essais de compoundage se sont révélés infructueux, l'agglomération du polymère avec le bois ne se faisant pas. La raison était un mauvais choix de matrice, présentant une trop grande ouverture de passage matière, empêchant de fait la chauffe du mélange. Nous sommes passé d'une matrice comportant des perforations de 3,4 mm à 2,8 puis 2,5 mm.

Pour éviter la formation de trop de poussières, la grille du granulateur à chaud a été changée pour passer d'une maille de 6 mm à 10 mm.

Par sécurité, nous avons travaillé à un débit de 200 kg/h, soit la capacité minimale de la ligne. Celle ci pouvant produire, pour ce genre de matériau, à un débit compris entre 200 et 500 kg/h, raisonnablement autour de 300 kg/h en moyenne. L'aspect des matériaux obtenus est conforme à nos attentes (Figure 10). Nous préconiserons de travailler avec des matrices comportant moins de trous et ceux-ci présentant un diamètre de 3,2mm pour obtenir des granulés plus proches des granulés standard utilisés en plasturgie.

Figure 10 : Prise d'échantillon de compound WPC au niveau de la mise en sacs en ligne

Les 4 grades indiqués dans le Tableau 5 ont ainsi été obtenus. Les deux grades sur base polyéthylènes présentent une densité apparente de 315 g/L, les 2 grades sur base polypropylène présentent une densité apparente de 290 g/L.

Figure 11 : Granulés de WPC (60%DEA-40% PEHD+additifs)

Le grade destiné au rotomoulage (PEHD-20% Bois DEA) a ensuite été micronisé sur un microniseur (broyeur) de type Pallmann PLM 800 (Figure 12).

Figure 12 : Ligne de micronisation Pallmann PLM800

Le broyeur PLM800 repose sur le principe d'attrition : c'est à dire que les particules à broyer sont envoyées dans un tourbillon intense d'air, généré par la mise en rotation d'un rotor au centre de contres-pales. Les particules s'entrechoquent conduisant ainsi à leur éclatement en particules plus fines, un dispositif de tamis internes permet de sélectionner la finesse des particules acceptable en sortie de ligne. Le choix de cette technologie a été motivé par le fait que le grand volume d'air brassé au cœur du broyeur refroidit la matière en cours de broyage. Dans notre cas, nous nous sommes ainsi assurés de ne pas provoquer la fusion de la phase polymère du composite.

Figure 13: Mise en sacs du composite PE20-4 micronisé

La poudre obtenue est fine et d'apparence homogène (Figure 13). Aucun souci technique n'est apparu pendant l'étape de micronisation.

Sur ce matériau micronisé nous avons mesuré la densité apparente, le taux d'humidité et la distribution granulométrique.

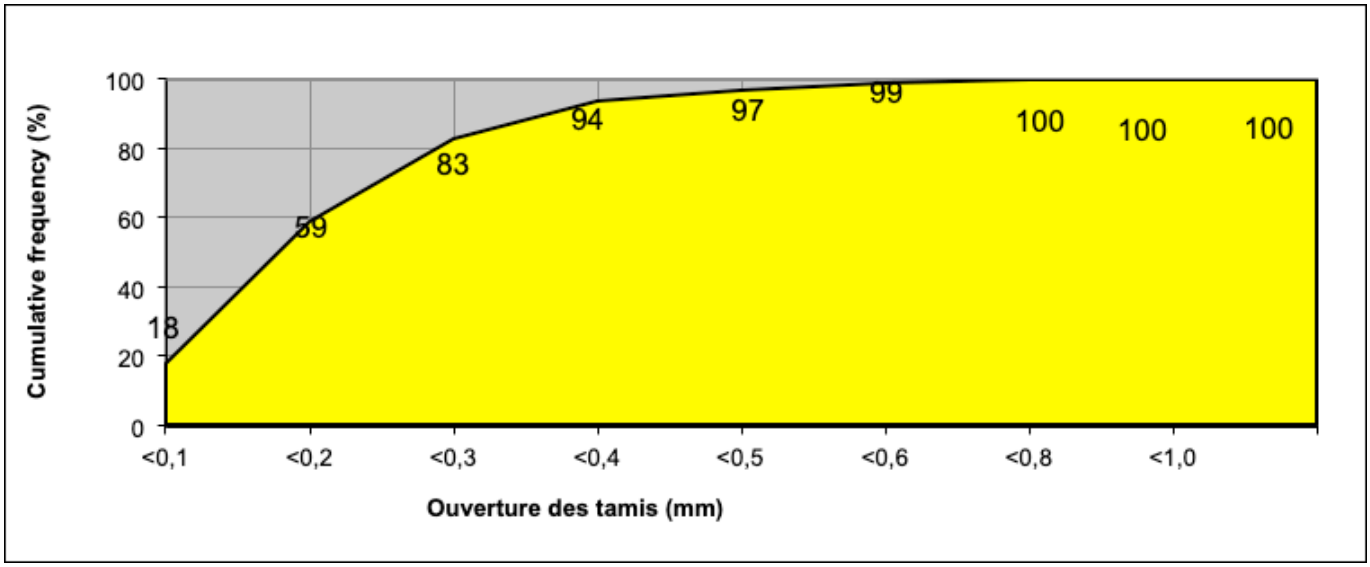
Le taux d'humidité mesuré est de **0,53 %**
La densité apparente mesurée est de **266 g/L**

La distribution massique est portée dans le Tableau 4 et la Figure 14. Le diamètre médian **D50 se situe vers 200 µm.**

% par fraction	*mm*	*% accumulés*
0,0 %		**100,0 %**
0,0 %	<1,0	**100,0 %**
1,0 %	<0,8	**100,0 %**
2,0 %	<0,6	**99,0 %**
3,0 %	<0,5	**97,0 %**
11,0 %	<0,4	**94,0 %**
24,0 %	<0,3	**83,0 %**
41,0 %	<0,2	**59,0 %**
18,0 %	<0,1	**18,0 %**

Tableau 4 : répartition des fractions massiques en fonction des tailles de particules du WPC micronisé

Le débit moyen mesuré lors de cet essai était de **277 kg/h** pour un débit théorique de 346 kg/h.



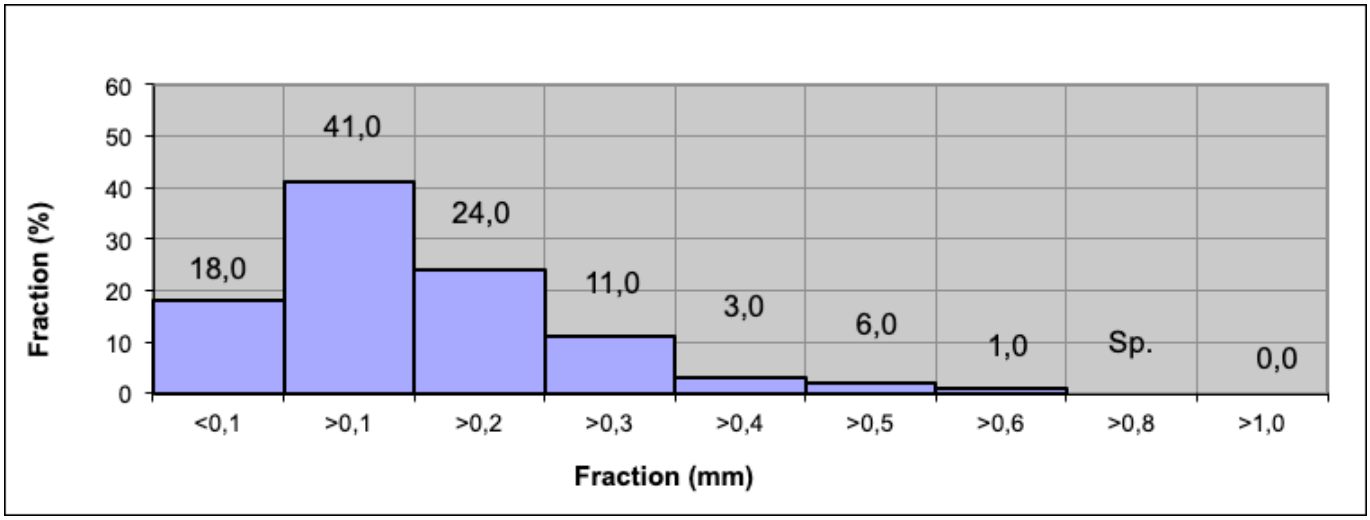


Figure 14 : Distribution granulométrique du WPC PE20-4 micronisé

2.3. Phase 2 : Caractérisation du compound

Nous rappellerons dans le Tableau 5 les formulations produites et décrite dans le rapport #1.

Référence formulation	Taux de bois DEA micronisé	Nature et taux de résine plastique	Lubrifiant	Additif
PE60-4	60%	PEHD MFI4, 31%	TPW113, 4%	Bondyram 5108, 5%
PE20-4	20%	PEHD MFI4, 71%	TPW113, 4%	Bondyram 5108, 5%
PP40-100	40%	PP MFI100, 51%	TPW113, 4%	Bondyram 1001, 5%
PP40-55	40%	PP MFI55, 51%	TPW113, 4%	Bondyram 1001, 5%

Tableau 5 : formulations réalisées

Les compounds destinés à l'injection moulage (PP40-100 et PP40-55), au rotomoulage (PE20-04) et à l'extrusion (PE60-4) ont été injectés en éprouvettes.

Deux types d'éprouvettes ont été réalisés pour satisfaire les normes des caractérisations mécaniques au choc et en traction.

2.3.1. Conditions opératoires

A. Essais mécaniques en traction

a. Protocole d'essai

Détermination du module élastique, de la contrainte et de la déformation à la rupture.

Conforme aux normes :

NF EN ISO 527-1 « Plastiques - Détermination des propriétés en traction – Partie 1 : Principes généraux »

NF EN ISO 527-2 « Plastiques - Détermination des propriétés en traction – Partie 2 : Conditions d'essai des plastiques pour moulage et extrusion »

b. Éprouvettes

Préparation : éprouvettes moulées par injection à partir des granulés de compound

Type : Eprouvettes de type 1
Conditionnement : à T= 23°C pendant 48h
Nombre d'éprouvettes : 5 éprouvettes testées et validées par lot d'échantillons

c. Appareillage et conditions opératoires

Machine d'essai universelle Zwick équipée d'un capteur 10kN
Vitesse d'essai : 1 mm/min puis 50 mm/min
Longueur initiale entre les mors L_0 = 115 mm

B. Choc Charpy

a. Protocole d'essai

Détermination de la résistance au choc Charpy

Conforme à la norme :
NF EN ISO 179-1 « Plastiques - Détermination de la résistance au choc Charpy – Partie 1 : Essai de choc non instrumenté »

b. Éprouvettes

Préparation : éprouvettes moulées par injection à partir des granulés de compound
Type : Eprouvettes de type 1A sans entaille
Conditionnement : Aucun conditionnement particulier
Nombre d'éprouvettes : 10 éprouvettes par lot d'échantillons

c. Appareillage et conditions opératoires

Machine de choc Zwick
Pendule utilisé : 5 Joules
Direction de percussion : Debout

2.3.2. Résultats

A. Essais mécaniques en traction : Mesure de la contrainte et de la déformation maximales et à la rupture et détermination du module d'élasticité

PE 20-04

Eprouvettes	Module d'élasticité E (MPa)	Contrainte maximale (MPa) σ_M	Allongement à la contrainte maximale (%) ε_M	Commentaires
1	1869	24,5	3,9	Rupture
2	1790	24,5	3,9	Rupture
3	1858	24,6	3,4	Rupture
4	1835	24,8	3,6	Rupture
5	1832	24,8	3,7	Rupture
Moyenne	**1837**	**24,6**	**3,7**	/
Ecart-type	**31**	**0,2**	**0,2**	/

Remarque : la contrainte à la rupture est égale à la contrainte maximale

PE 60-04

Eprouvettes	Module d'élasticité E (MPa)	Contrainte maximale (MPa) σ_M	Allongement à la contrainte maximale (%) ε_M	Commentaires
1	3389	32,2	1,9	Rupture
2	3422	32,3	2,1	Rupture
3	3444	31,9	1,9	Rupture
4	3274	32,5	1,9	Rupture
5	3450	32,3	1,9	Rupture
Moyenne	**3396**	**32,2**	**1,9**	/
Ecart-type	**72**	**0,2**	**0,1**	/

Remarque : la contrainte à la rupture est égale à la contrainte maximale

PP 40-55

Eprouvettes	Module d'élasticité E (MPa)	Contrainte maximale (MPa) σ_M	Allongement à la contrainte maximale (%) ε_M	Commentaires
1	3076	29,9	2	Rupture
2	3153	28,6	1,8	Rupture
3	3148	29,2	1,9	Rupture
4	3188	29,4	1,9	Rupture
5	3162	29,7	2	Rupture
Moyenne	**3145**	**29,4**	**1,9**	/
Ecart-type	**42**	**0,5**	**0,1**	/

Remarque : la contrainte à la rupture est égale à la contrainte maximale

PP 40-100

Eprouvettes	Module d'élasticité E (MPa)	Contrainte maximale (MPa) σ_M	Allongement à la contrainte maximale (%) ε_M	Commentaires
1	3233	31,3	2	Rupture
2	3245	31,0	2	Rupture
3	3182	30,6	1,9	Rupture
4	3243	30,8	1,9	Rupture
5	3241	30,5	1,8	Rupture
Moyenne	**3229**	**30,8**	**1,9**	/
Ecart-type	**26**	**0,3**	**0,1**	/

Remarque : la contrainte à la rupture est égale à la contrainte maximale

B. Choc Charpy

PE 20-04

N°	C	P	N	Section (mm^2)	Energie absorbée (J)	Résilience ($kJ/m^{2)}$
1	X			37	0,7	**18**
2	X			37	0,5	**14**
3	X			37	0,7	**20**
4	X			37	0,7	**18**
5	X			37	0,6	**16**
6	X			37	0,6	**17**
7	X			37	0,6	**17**
8	X			37	0,5	**12**
9	X			37	0,6	**16**

(C) Rupture complète, (P) Rupture partielle, (N) sans rupture

Résilience moyenne : 17 kJ/m²

PE 60-04

N°	C	P	N	Section (mm^2)	Energie absorbée (J)	Résilience ($kJ/m^{2)}$
1	X			38	0,3	**8**
2	X			38	0,3	**9**
3	X			38	0,3	**9**
4	X			38	0,3	**9**
5	X			37	0,4	**10**
6	X			38	0,4	**10**
7	X			38	0,3	**9**
8	X			38	0,4	**10**
9	X			38	0,4	**10**
10	X			38	0,4	**9**

(C) Rupture complète, (P) Rupture partielle, (N) sans rupture

Résilience moyenne : 9 kJ/m²

PP 40-55

N°	C	P	N	Section (mm^2)	Energie absorbée (J)	Résilience ($kJ/m^{2)}$
1	X			38	0,3	**9**
2	X			38	0,3	**9**
3	X			37	0,4	**10**
4	X			38	0,3	**8**
5	X			37	0,3	**7**
6	X			37	0,4	**11**
7	X			37	0,4	**10**
8	X			38	0,4	**10**
9	X			38	0,4	**10**
10	X			38	0,3	**9**

(C) Rupture complète, (P) Rupture partielle, (N) sans rupture

Résilience moyenne : 9 kJ/m²

REF PP 40-100

N°	C	P	N	Section	Energie absorbée (J)	Résilience ($kJ/m^{2)}$

				(mm^2)		
1	X			37	0,3	**7**
2	X			38	0,4	**11**
3	X			37	0,4	**11**
4	X			38	0,4	**10**
5	X			38	0,4	**11**
6	X			37	0,3	**8**
7	X			38	0,3	**9**
8	X			38	0,4	**10**
9	X			38	0,3	**9**
10	X			37	0,4	**10**

(C) Rupture complète, (P) Rupture partielle, (N) sans rupture

Résilience moyenne : 10 kJ/m²

2.3.3. Analyse

		Traction			Choc Charpy
		Contrainte à la rupture (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module (MPa)	Résilience (kJ/m2)
PE20-4	Rotomoulage	24,6	3,7	1837	17
PE60-4	Extrusion	32,2	1,9	3396	9
PP40-55	Injection	29,4	1,9	3145	9
PP40-100	Injection	30,8	1,9	3229	10
PP vierge	*Référence*	*26*	*>50%*	*1250*	*Pas rupture*
WPC 40%	*Référence PP Bois (grade plastifibre)*	*16,28*	*1,7*	*3113*	*N.C.*

Tableau 6 : Résumé des propriétés mécaniques des matériaux développés

L'incorporation de bois dans les résines polymères, ici respectivement le polyéthylène haute densité (PE-HD) et le polypropylène (PP), induit une rigidification du matériau : le module d'élasticité passe de 800-1200 MPa pour un PE-HD vierge à 1837 MPa après adjonction de 20% de bois broyé, et 3396 MPa pour le grade PE60-4 ; pour le polypropylène on passe d'un module de environ 1300 MPa pour un PP vierge à plus de 3000 MPa pour le PP chargé à 40% de bois.

Cette augmentation sensible de la rigidité se traduit également par une diminution de la résilience du matériau : la résilience s'établit entre 9 et 10 kJ/m^2 pour les grades PE-HD et PP chargés à plus de 30% de bois.

L'ajout de bois DEA micronisé modifie le comportement de la résine polyoléfinique support en la rendant plus rigide et donc plus cassante au choc sans toutefois affecter négativement sa résistance mécanique aux contraintes statiques (lentes) : augmentation de 15% de la contrainte à la rupture.
Par comparaison de WPC de mêmes taux de charge et de mêmes résines supports (Cf. Tableau 6, grade WPC référence), les propriétés du DEA broyé sont semblables à celle de bois naturel, la contrainte à la rupture étant même légèrement meilleure pour le DEA.

2.4. *Phase 2 : essais de mise en œuvre sur lignes industrielles*

2.4.1. Rotomoulage

Le rotomoulage, ou moulage rotationnel, est une technique de mise en forme des matières plastique pour obtenir des objets creux, souvent de grande taille (cuves, citernes et réservoirs notamment).

Du plastique broyé en poudre fine est introduit dans un moule. Après fermeture du moule, celui ci est mis en rotation sur au moins 2 axes (en général 3) et placé dans l'enceinte d'un four. La chaleur conduit à la fusion du plastique au contact du moule, la rotation de ce dernier combinée à la viscosité du plastique fondu permet d'obtenir une couche uniforme de plastique « liquide ». Sans arrêter la rotation, le moule est alors sorti du four et placé devant des ventilateurs et/ou brumisateurs pour refroidir le plastique jusqu'à le rendre à nouveau solide et prêt à être démoulé.

Une machine de rotomoulage comporte généralement 3 bras placés à 120 degrés pour permettre le remplissage d'un moule, pendant qu'un second est en phase de chauffe et un troisième en station de refroidissement. Le temps de chaque étape est généralement de 20mn pour un temps de cycle complet de 60mn.

Figure 15 : Unité de rotomoulage avec, au premier plan, la station de remplissage du moule (ici moule fermé) et, au second plan, la station de chauffe (four SAT)

Figure 16 : Unité de rotomoulage avec, au premier plan, la station de remplissage du moule (ici moule fermé) et, au second, (à G.) la station de refroidissement par ventilation d'air froid

Pour nos essais nous avons utilisé une ligne de rotomoulage de marque SAT et un moule destiné à la production de feux de signalisation pour chantiers routiers.

Les conditions opératoires ont été prises identiques à la série : 270°C de consigne de température dans l'enceinte du four et un temps de cuisson de 22 mn.

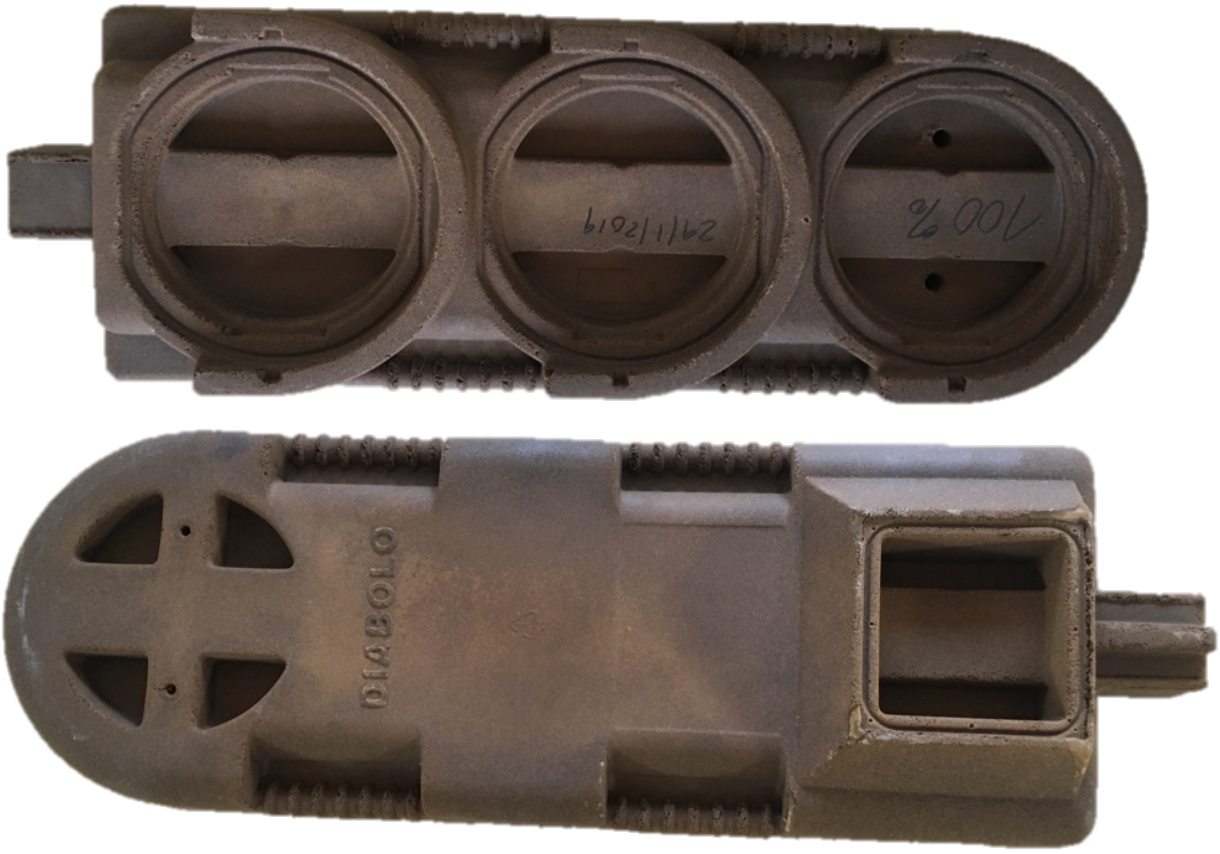


Figure 17 : Pièce moulée en WPC PE20-4 chargé à 20% de DEA broyé

Comme le montre la **Figure 17**, la matière développée, PE20-4 (WPC micronisé chargé à 20% de DEA broyé sur base PE-HD), est rotomoulable : une pièce est obtenue.

Toutefois, le tendu de surface est déplorable, de nombreuses aspérités sont observables comme le montre la Figure 18.

Figure 18 : Détail de la pièce moulée en WPC PE20-4 chargé à 20% de DEA broyé

D'autre part, l'odeur se dégageant lors de la cuisson de la matière est nauséabonde, sans doute du fait de la présence de colles dans les DEA. La dégradation thermique de ces dernières doit vraisemblablement conduire à l'émission de composés azotés odorants (R-NH_2, R-NH-R'…). Cette décomposition pourrait également expliquer en partie l'état de surface de la pièce où les cavités

observées pourraient résulter de la présence de bulles de gaz. La présence d'humidité (matière non étuvée) pourrait également expliquer en partie ce phénomène.

Afin de contrôler ce point nous avons baissé le taux de bois en diluant le compound avec du PE-HD vierge micronisé. Nous avons réalisé les dilutions suivantes : 50% WPC-50% PE-HD (Figure 19) et 25% WPC-75% PE-HD (Figure 20), le taux de bois étant ainsi respectivement abaissé à 10% et 5%.

Figure 19 : Pièce moulée en WPC PE20-4 dilué à 50% (10% de bois)

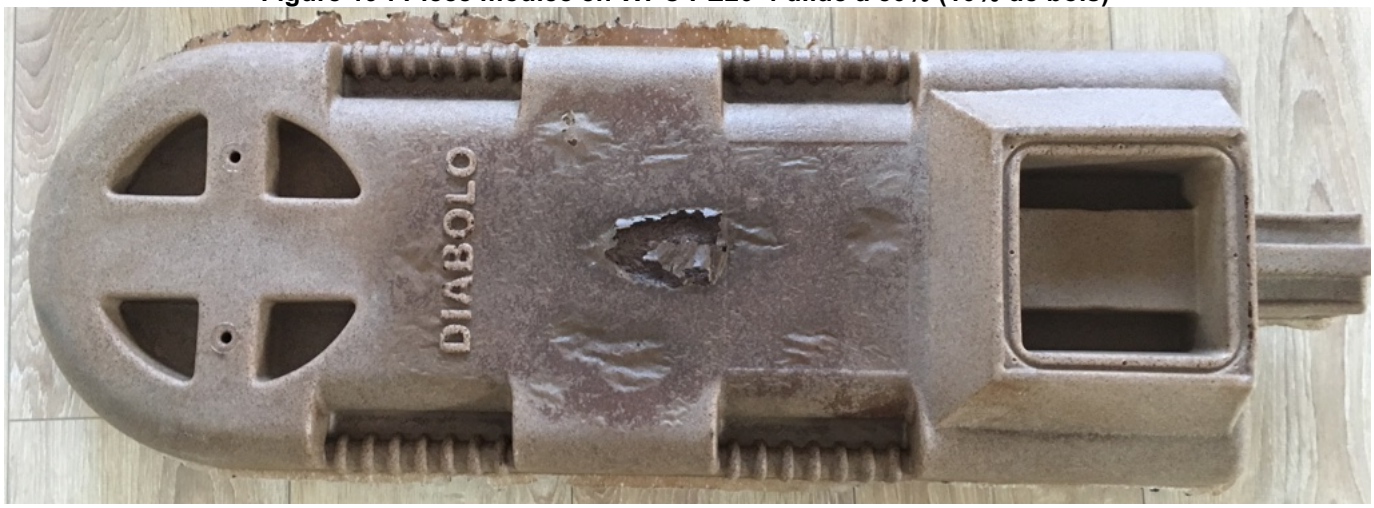


Figure 20 : Pièce moulée en WPC PE20-4 dilué à 75% (5% de bois)

Même à forte dilution on retrouve un état de surface rugueux, avec des traces de poches de gaz nettement marquées. L'odeur des pièces est également très forte.

Nous avons conduit un dernier essai avec 100% de compound WPC en augmentant la température du four au maximum (300°C) pour favoriser la fusion de la phase polymère. Cet essais s'est révélé non concluant, le bois commençant à se dégrader thermiquement.

En conclusion de ces essais, le rotomoulage est techniquement possible, nous avons obtenu des pièces, cependant la qualité de ces dernières est faible. Nous noterons toutefois qu'un abaissement de la température de rotomoulage serait bénéfique en combinaison avec un accroissement du temps de cuisson de l'ordre de 50%. Nous n'avons pas pu réaliser cet essai du fait de la ligne utilisée, qui est calibrée pour des temps de poste de 22mn.

Le rotomoulage étant déjà un procédé lent, un ralentissement supplémentaire des cadences hypothéquerait sa rentabilité. D'autre part, le taux de bois intégrable dans ce procédé demeure très

faible (20% maximum) et l'odeur des pièces ne peut autoriser que des applications en extérieur et sans contact avec des milieux sensibles.

2.4.2. Injection moulage

Conscients du marché potentiel de l'injection moulage pour une matière thermoplastique, nous avons formulé des grades supplémentaires dédiés à ce procédé de mise en forme.

Les grades PP40-100 et PP40-55 ont été étuvés pendant 4h avant emploi pour les débarrasser de leur humidité résiduelle (Figure 21).

Figure 21 : Unités d'étuvage utilisées pour les WPC injectables

Les matières ont ensuite été injectées dans un moule à double empreinte monté sur une presse d'injection moulage électrique Arburg Allrounder 470 E (Figure 22) disposant d'une force de fermeture de 100 tonnes.

Figure 22 : Presse d'injection moulage utilisée pour les essais

Le profil de température optimal utilisé est présenté Figure 23.

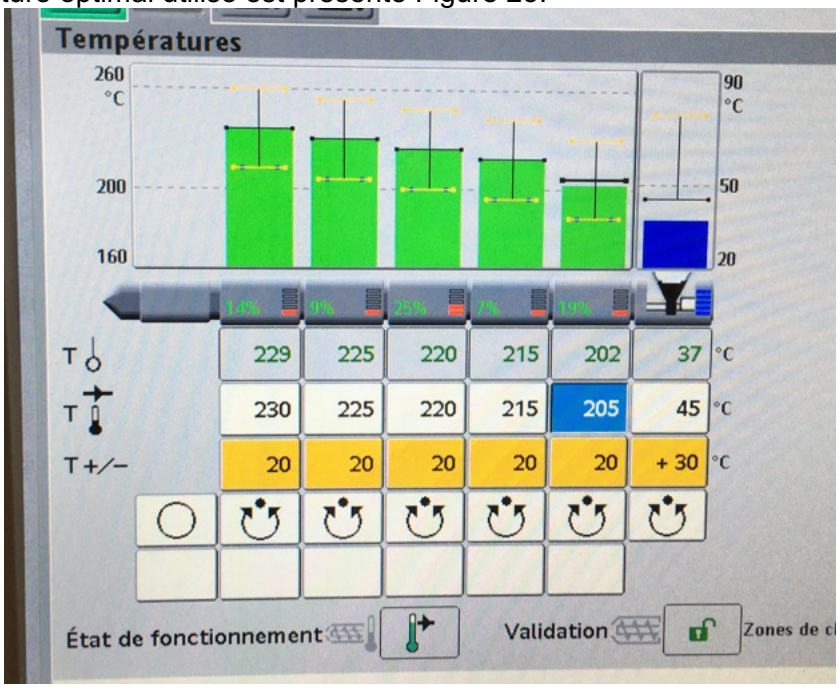


Figure 23 : Profil de température optimal des essais

Nous avons ainsi pu réaliser avec succès des pièces injectées (supports de cadres photo, Figure 24)

Figure 24 : Pièces injectées

Les deux grades développés se sont révélés facilement injectables. Le grade le moins fluide (PP40-55) permettant sur notre pièce d'avoir un meilleur tendu de surface. On notera quelques défauts de surface, communément appelés « givrage ». Ce phénomène est occasionné par : soit un défaut de séchage, l'évaporation subite de l'humidité conduisant à cet aspect légèrement rugueux, soit un dégazage des colles contenues dans les DEA. Une légère baisse des températures d'injection et l'utilisation de moules avec des évents optimisés, voire mis sous vide permettront de faire disparaître le phénomène.

L'essai se réalisant très bien, nous avons cherché une approche esthétique en ajoutant au WPC un colorant acajou. La dispersion s'est révélée bonne.

Nous avons également testé la compatibilité de la matière avec la gravure Laser (Figure 25 et Figure 26) qui s'est montrée particulièrement efficace, contrairement à une matière vierge.

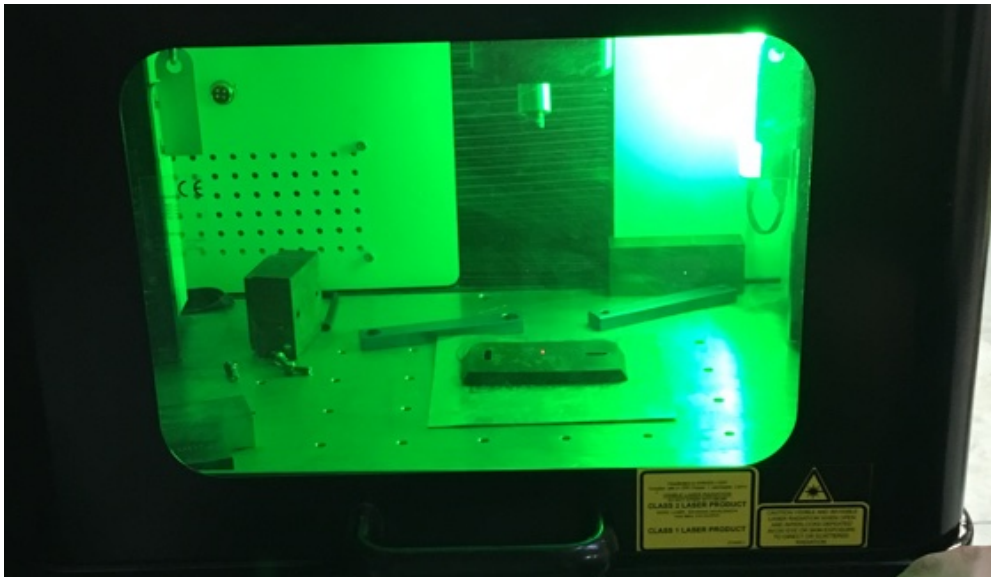


Figure 25 : Pièce en cours de marquage Laser

Figure 26 : Pièce injectée en WPC PP40-100 marquée au Laser

En conclusion, l'injection moulage est un marché parfaitement accessible aux WPC à base de DEA.

2.4.3. Extrusion

Le grade PE60-4 a été mis en forme par extrusion sur une ligne dotée d'une extrudeuse bi-vis contrarotatives de marque Kraus Maffei et de type KMD 2-90 Z.

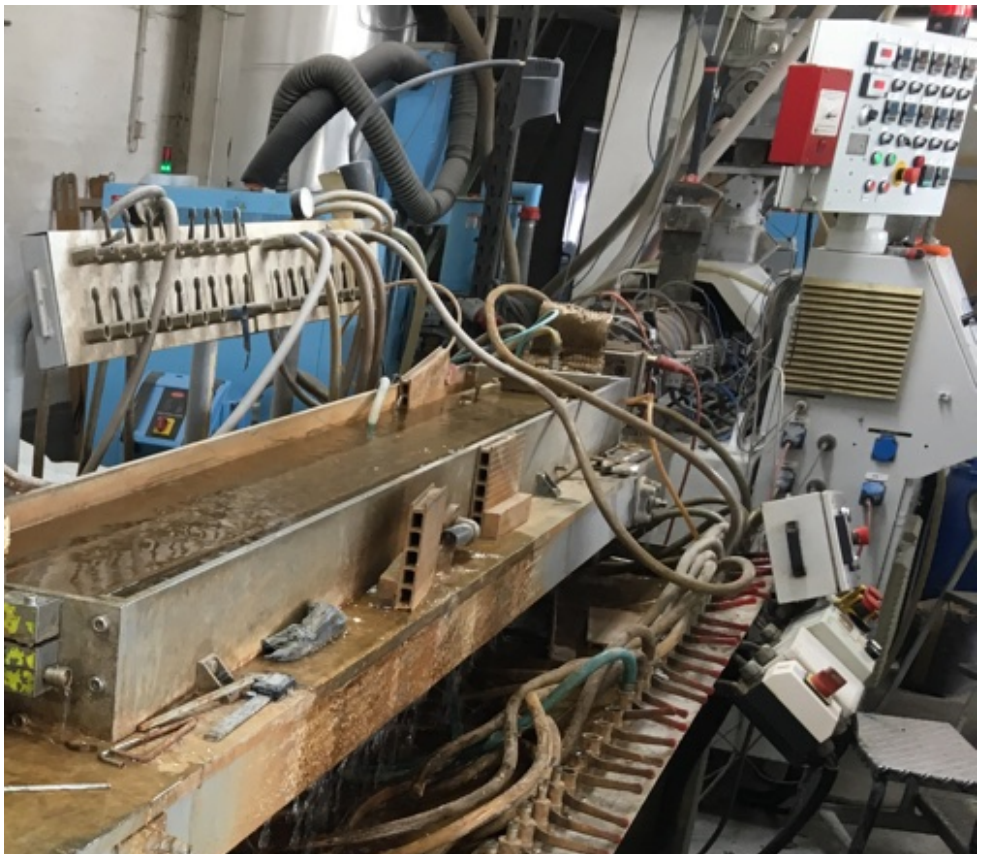


Figure 27 : Ligne d'extrusion avec au premier plan le bac de refroidissement

Nous avons commencé les essais avec une filière de planches de terrasse pleine. La matière a été étuvée en ligne à 80°C pendant environ 30mn.

Figure 28 : Accompagnement de la première paraison extrudée

Figure 29 : Sortie de la paraison (profil) de la filière (à D.) et entrée dans l'écluse du bac de refroidissement (à G.)

Les profilés pleins ont été obtenus avec une relative facilité, la matière chaude se comportant de façon assez élastique et non cassante comme habituellement pour un bois composite. Cette tolérance de la matière est une aide précieuse pour le réglage de la ligne.

Nous avons constatés la présence de traces claires sur les profils (Figure 30). Ces traces traduisent une dispersion imparfaite du bois dans la matrice polymère. Ce défaut est lié à un dégazage imparfait de la ligne du fait d'un reflux de matière surfondue au niveau de la prise de vide du dégazeur. Ce reflux peut être amélioré en augmentant la taille des granulés de compounds. D'autre part, pour ces composites à base de DEA présentant une tendance naturelle à l'émission de gaz lors de la chauffe (observée en rotomoulage et en injection moulage), une prise de vide en fin de fourreau d'extrudeuse améliorerait le process.

Figure 30 : Profil en cours d'extrusion illustrant des défauts lié au dégazage imparfait

Nous avons néanmoins obtenus des profils droits et lisses avec la filière pleine. Nous avons alors ajouté un colorant acajou pour se rapprocher des produits de série.

Figure 31 : Profil extrudé plein avec colorant acajou

La dispersion du colorant n'est pas tout à fait parfaite, traduisant un manque de travail des vis de l'extrudeuse. Ce manque peut être occasionné soit par une trop forte concentration en lubrifiant (le filet des vis tend alors à patiner au lieu de cisailler la matière) et/ou l'ensemble vis-fourreau de l'extrudeuse présente une usure importante. En passage en mode « série » nous conseillerons de réduire la lubrification à 3% au lieu de 4%.

L'extrusion se déroulant très bien, nous avons pu essayer d'ajouter une finition par brossage en ligne.

Figure 32 : Brossage par brosse laiton (à G.) et profil en sortie de la ligne de brossage (à D.)

On retrouve un aspect de surface irrégulier, exacerbant les défauts de planéité du profil d'une part, et sans doute également les défaut de dispersion de la matière lors de l'extrusion (zones plus riches en bois à rapprocher des zones plus dures et donc moins sensibles au brossage). Ces défauts pourraient être corrigés par l'emploi de brosses plus dures que celle en laiton utilisées.

En abaissant légèrement la brosse, le brossage s'en trouve amélioré pour présenter un aspect de surface jugé flatteur par l'extrudeur.

Figure 33 : Profil extrudé plein naturel brut (à G.), coloré brut (au centre) et coloré brossé à (D.)

Forts de ces essais concluants, nous avons procédé au changement de filière pour utiliser une filière alvéolaire plus technique (Figure 34).

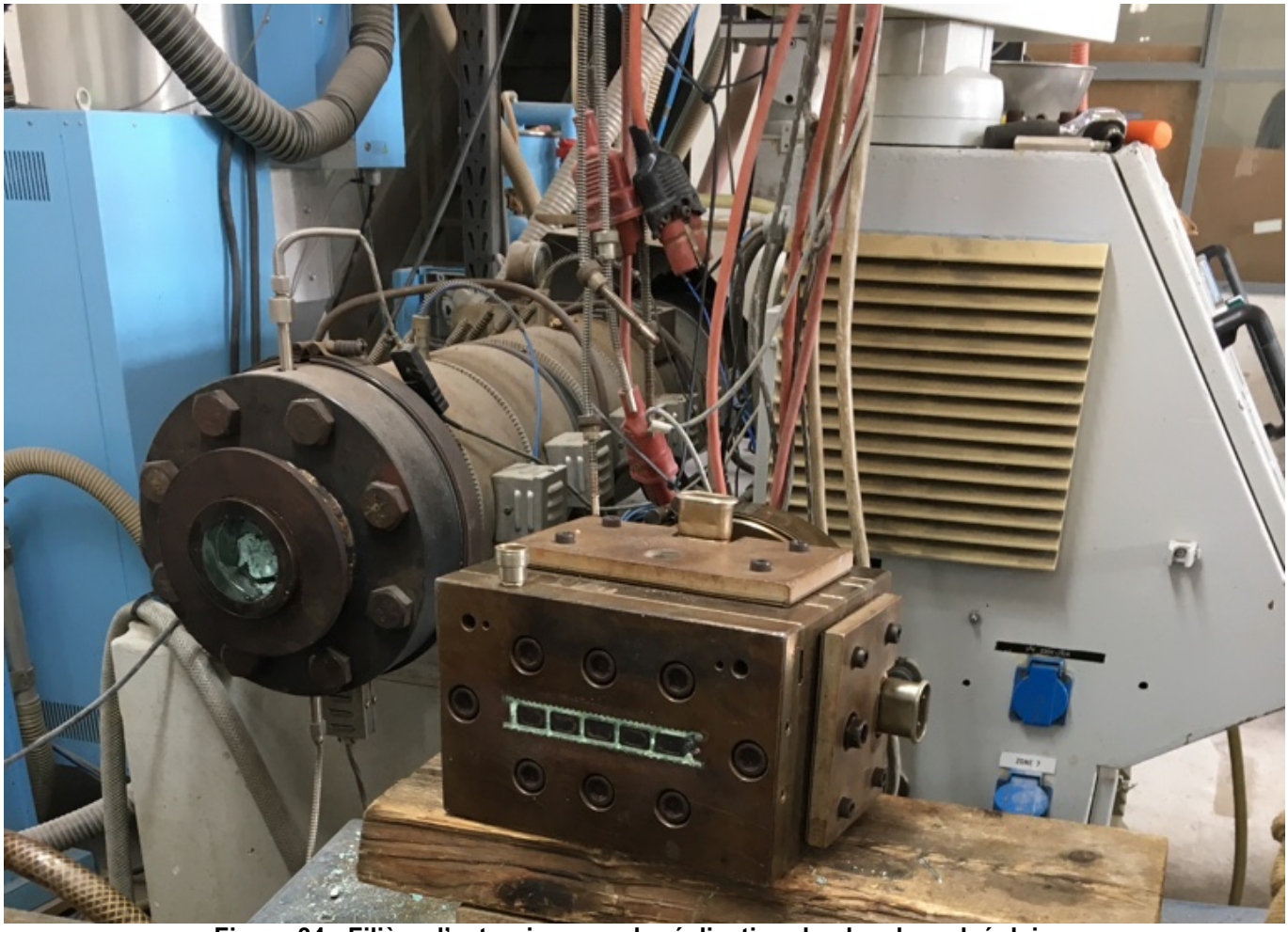


Figure 34 : Filière d'extrusion pour la réalisation de planches alvéolaires

Comme pour le profilé plein, le profilé alvéolaire chaud et plastique présente une élasticité importante pour un composite, rendant sa manipulation facile. La Figure 35 montre le cheminement de la paraison jusqu'à obtenir un profil rigide pouvant être découpé et brossé en ligne.

Figure 35 : Suivi d'avancement du profilé alvéolaire de sa sortie de filière au banc de tirage et de découpe
(Rq : à l'arrière-plan on devine le banc de brossage en ligne)

A l'instar de la production du profilé plein, la fabrication du profilé alvéolaire montre l'importance du dégazage (les parois étant plus fines, la déformation de la surface est plus marquée), et le léger manque de travail en cisaillement des vis de l'extrudeuse.

Figure 36 : Profil extrudé alvéolaire avec colorant acajou en sortie de table de découpe

Bien que la matière WPC soit un grade expérimental et non une matière optimisée par la production en série, notre grade d'essai répond parfaitement à la demande initiale : parvenir à la réalisation de pièces de démonstration. L'extrusion est donc un marché tout à fait accessible à nos matériaux. Les essais ont même révélé une certaine facilité et souplesse de mise en forme.

2.5. Phase 3 : Tests et mesures des caractéristiques des produits finis

Nous avons caractérisé les propriétés mécaniques des planches extrudées. Les planches alvéolaires représentant la large majorité des produits commerciaux, nous avons sélectionné ces dernières pour réaliser les caractérisations physico-mécaniques. Pour la tenue aux termites, notre choix s'est porté sur les planches pleines afin de disposer d'éprouvettes conformes aux normes en vigueur.

2.5.1. Mesure de la densité

La densité de la matière extrudée est calculée à partir de la lame extrudée alvéolaire. Cette lame présente une section de 1296 mm^2. Un échantillon de 41,1cm de long pesant 673g, la densité de la lame, et donc du matériau extrudé, est de 1,234 (ou une masse volumique de 1,234 kg/L)

2.5.2. Flexion 3 points

2.5.2.1. Présentation des essais flexion 3 points

Les essais d'orientation en flexion 3 points sont réalisés selon la norme NF EN 15534-1+A1 « Composites à base de matières cellulosiques et de thermoplastiques (communément appelés composites bois-polymères (WPC) ou composites fibres d'origine naturelle (NFC)) — Partie 1 : Méthodes d'essai pour la caractérisation des compositions et des produits » : 2018. Ces essais permettent de déterminer le module d'élasticité longitudinal global et la résistance en flexion.
7 échantillons sont testés afin d'obtenir une valeur moyenne ainsi qu'une valeur caractéristique pour chaque caractéristique mécanique. Les valeurs caractéristiques sont déterminées selon la norme NF EN 14358 « Structure en bois – Détermination des valeurs caractéristiques » : 2016.

A. Montage d'essai

Les essais sont réalisés sur une machine universelle d'essai, équipée d'une cellule de charge de capacité 100kN, préalablement étalonnée. Les éprouvettes d'essai sont chargées jusqu'à rupture. La vitesse de chargement est définie selon la norme NF EN 15534-1+A1 :

$$v = 0{,}74 \times h = 0{,}74 \times 22 = 16{,}28\ mm/min$$

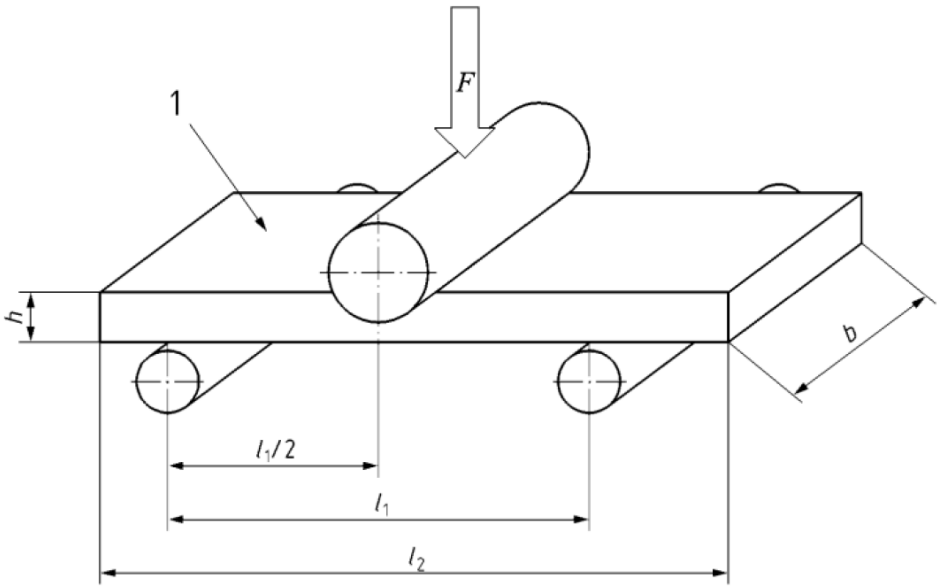


Figure 37 : Principe d'application de la charge selon la norme NF EN 15534-1+A1

Deux capteurs de déplacements linéaires sont placés sous la lame, au niveau de la tête de chargement afin de mesurer la flèche moyenne.

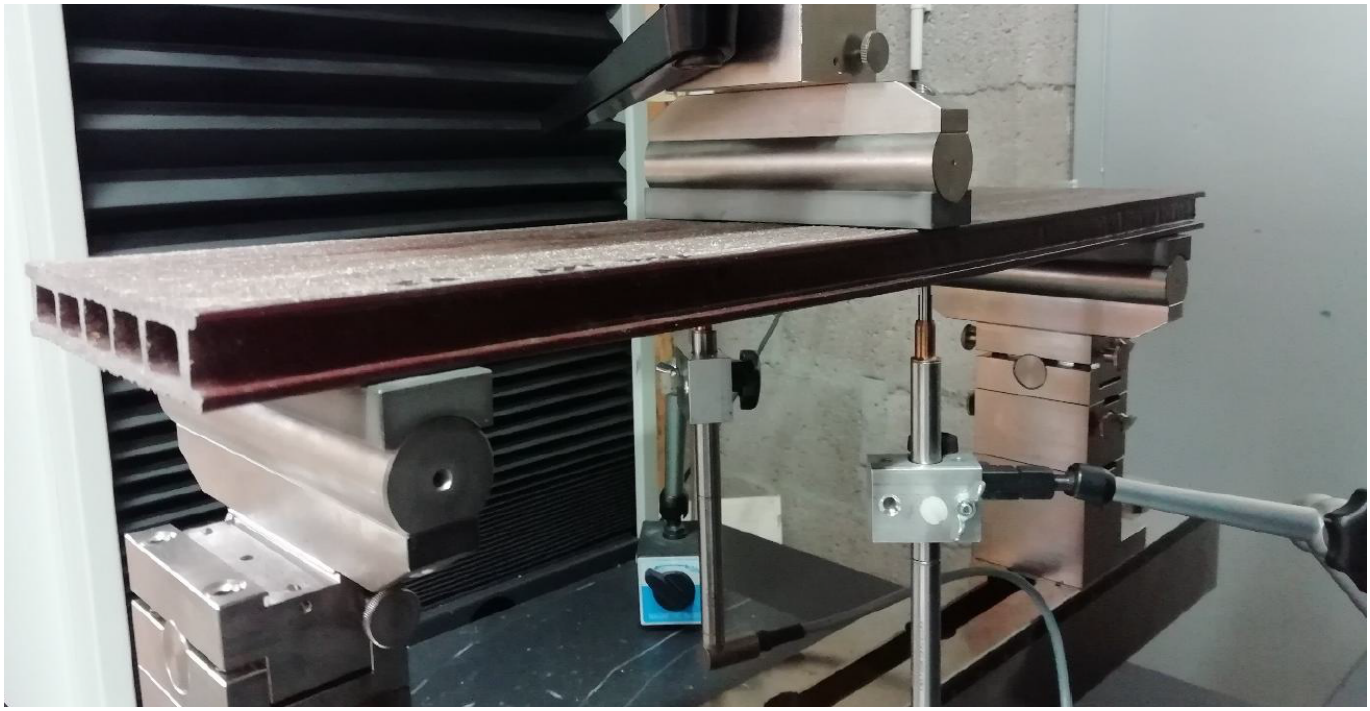


Figure 38 : Montage d'essais en flexion 3 points

Des plats métalliques sont mis en place au niveau des appuis et de la tête de chargement afin de limiter le poinçonnement local.

B. Détermination du module d'élasticité longitudinal

Le module d'élasticité longitudinal est calculé d'après la norme NF EN 15534-1+A1 selon la formule suivante :

$$E_m = \frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{48 \times J_x \times (a_2 - a_1)}$$

Avec :
- E_m [MPa] : Module d'élasticité longitudinal.
- l_1 [mm] : Distance entre appuis.
- F_1 [N] : Force correspondant à 10% de l'effort à rupture.
- F_2 [N] : Force correspondant à 20% de l'effort à rupture.
- a_1 [mm] : Flèche à mi-travée à 10% de l'effort à rupture.
- a_2 [mm] : Flèche à mi-travée à 20% de l'effort à rupture.
- J_x [mm^4] : Moment d'inertie de la section.

Le moment d'inertie de la section est obtenu grâce au logiciel Solidworks2017.

C. Détermination de la résistance en flexion

La résistance en flexion est calculée d'après la norme NF EN 15534-1+A1 selon la formule suivante :

$$\sigma_m = \frac{F_{max} \times l_1}{4 \times W_x}$$

Avec :
- σ_m [MPa] : Résistance à la flexion.
- F_{max} [N] : Charge maximale.
- l_1 [mm] : Distance entre appuis.
- W_x [mm^3] : Moment de la section.

Moment de la section :

$$W_x = \frac{J_x}{h/2}$$

Avec :
- W_x [mm^3] : Moment de la section.
- J_x [mm^4] : Moment d'inertie de la section.
- h [mm] : Epaisseur de l'éprouvette.

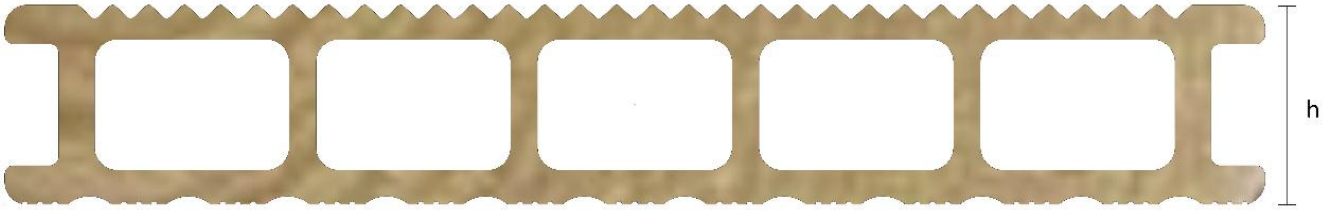


Figure 39 : Epaisseur de l'éprouvette

2.5.2.1. Présentation des échantillons

Les échantillons soumis aux essais sont les lames alvéolaires de dimensions 540 x 140 x 22 mm.
Le profil de lame de terrasse est modélisé sous CadWork à l'aide du plan côté de la filière utilisée pour l'extrusion, puis importé sous Solidworks2017 pour obtenir le moment d'inertie de la section.

Figure 40 : Modélisation d'une lame de terrasse sous CadWork

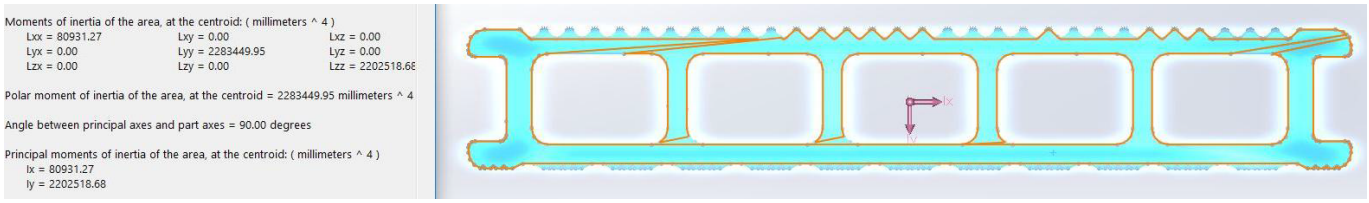


Figure 41 : Solidworks2017 ; moment d'inertie de la section

Ainsi, le moment d'inertie de la section des lames de terrasse est de 80931,27 mm^4. Cette donnée permettra de calculer la résistance en flexion et le module d'élasticité longitudinal.

2.5.2.1. Présentation des résultats en flexion

N° éprouvette	Force à rupture Fmax [kN]	Module d'élasticité longitudinal E_m [MPa]	Résistance en flexion σ_m [MPa]
F1	1,53	3379,64	22,90
F2	1,52	3396,85	22,78
F3	1,51	3125,56	22,63
F4	1,54	3315,43	23,04
F5	1,55	3039,71	23,11
F6	1,56	3176,04	23,37
F7	1,51	3200,05	22,53
Moyenne	**1,53**	**3233,33**	**22,91**
Ecart-type	**0,02**	**111,98**	**0,23**
COV	**1,00%**	**3,46%**	**1,00%**

Tableau 7 : caractérisation en flexion 3 points du profil de terrasse alvéolaire

Résistance caractéristique à 5% d'exclusion en flexion : **22,35 MPa.**

Module d'élasticité longitudinal caractéristique à 5% d'exclusion : **2982,94 MPa**.

2.5.3. Résistance à l'humidité/gonflement et absorption d'eau pour le profil de lame de terrasse alvéolaire

2.5.3.1. Présentation de l'essai de résistance à l'humidité : gonflement et absorption d'eau

Les essais d'orientation sont réalisés selon le principe de la norme NF EN 15534-1+A1 Composites à base de matières cellulosiques et de thermoplastiques (communément appelés composites bois-polymères (WPC) ou composites fibres d'origine naturelle (NFC)) — Partie 1 : Méthodes d'essai pour la caractérisation des compositions et des produits. §8.3.1 (2018).

Les éprouvettes sont mesurées (longueur, largeur, épaisseur) et pesées à 24 h, 2 jours, 4 jours, 7 jours, 14 jours et 28 jours après l'immersion totale dans l'eau à une température de (20 ± 2) °C. L'absorption d'eau des lames de terrasses est calculée par la différence de masse des éprouvettes pour chaque période.

Nombre d'éprouvettes : 8 éprouvettes pour un profil de lame de terrasse

Dimension des éprouvettes : 100 mm de longueur, largeur et épaisseur réelles des lames de terrasse, ici environ 20 mm d'épaisseur et 140 mm de largeur.

L'essai a débuté le 13/03/19 et s'est terminé le 10/04/19.

Pour calculer le gonflement en épaisseur, largeur et longueur la formule suivante est utilisée :

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100$$

où t_1 est l'épaisseur, la largeur ou longueur de l'éprouvette avant immersion en mm et t_2 est l'épaisseur, la largeur ou longueur de l'éprouvette après immersion en mm. Le gonflement G_t est exprimé en %.

2.5.3.2. Présentation des résultats : gonflement et absorption d'eau

Les résultats présentés dans le Tableau 8 sont la moyenne des résultats obtenus sur les 8 échantillons mesurés.

Période de mesure	Gonflement épaisseur en %	Gonflement largeur en %	Gonflement en longueur en %	Absorption d'eau moyenne (différences de masses par période ; en gramme)
0-24h	0,33	0,00	0,02	3,13
24h-2j	0,66	0,02	0,07	0,98
2j-4j	0,53	0,02	0,09	3,05
4j-7j	2,00	0,03	0,42	6,83
7j-14j	0,47	0,05	0,26	4,79
14j-28j	0,11	0,01	0,02	2,74

Tableau 8 : Gonflement et absorption d'eau du profil alvéolaire

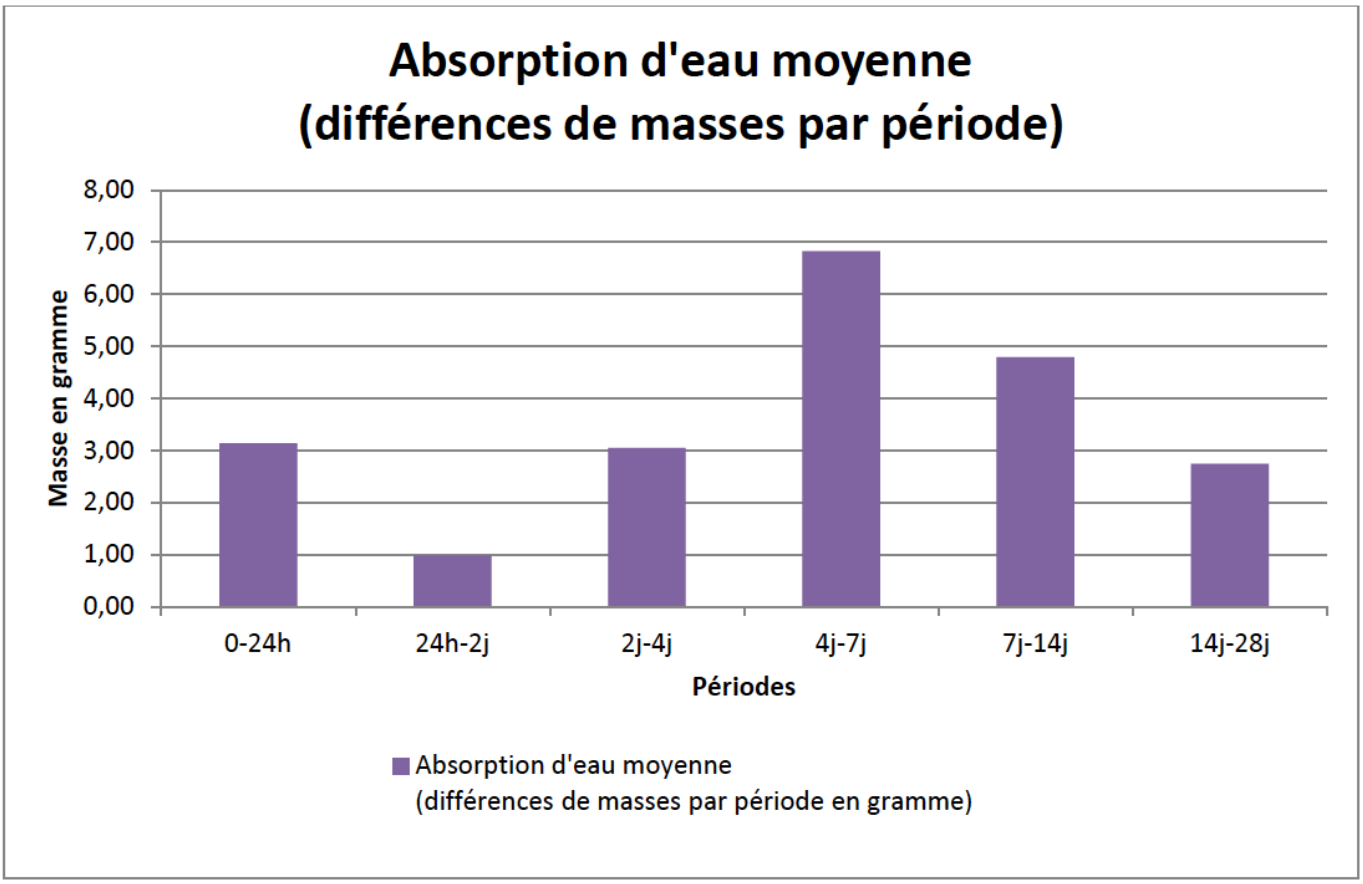


Figure 42 : Absorption d'eau moyenne par période de temps

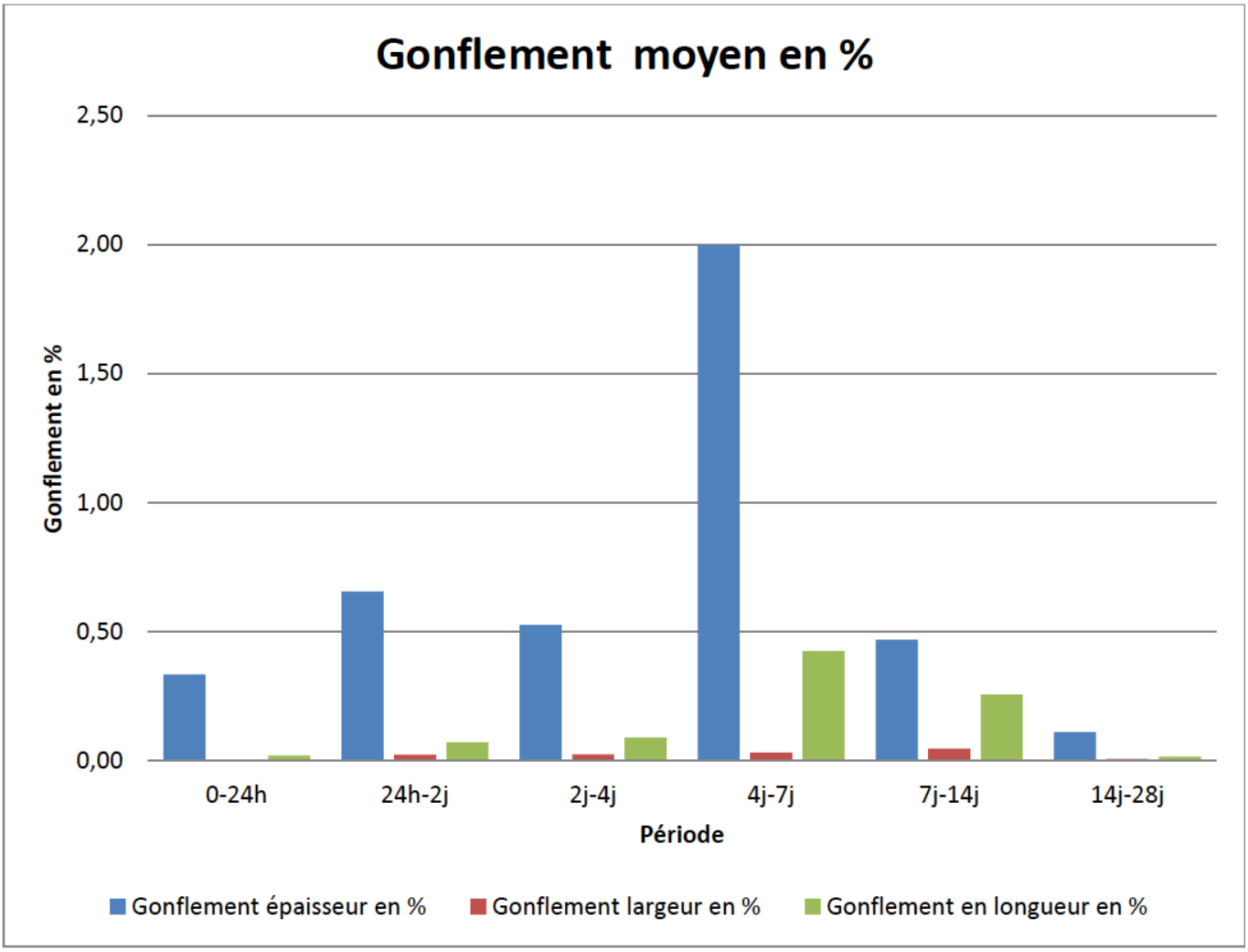


Figure 43 : Gonflements moyens par période de temps

Une autre manière de présenter les résultats consiste à comparer les éprouvettes mesurées à différentes périodes avec les valeurs de référence initiale.

Période de mesure	Gonflement épaisseur en %	Gonflement largeur en %	Gonflement longueur en %	Absorption d'eau moyenne (différences de masses avant immersion et après différents temps d'immersion ; en gramme)
0-24h	0,33	0,00	0,02	3,13
0-2j	0,99	0,03	0,05	4,11
0-4j	0,47	0,00	0,14	7,17
0-7j	1,51	0,03	0,56	13,99
0-14j	1,04	0,08	0,82	18,78
0-28j	1,15	0,07	0,81	21,53

Tableau 9 : Gonflement et absorption d'eau du profil alvéolaire

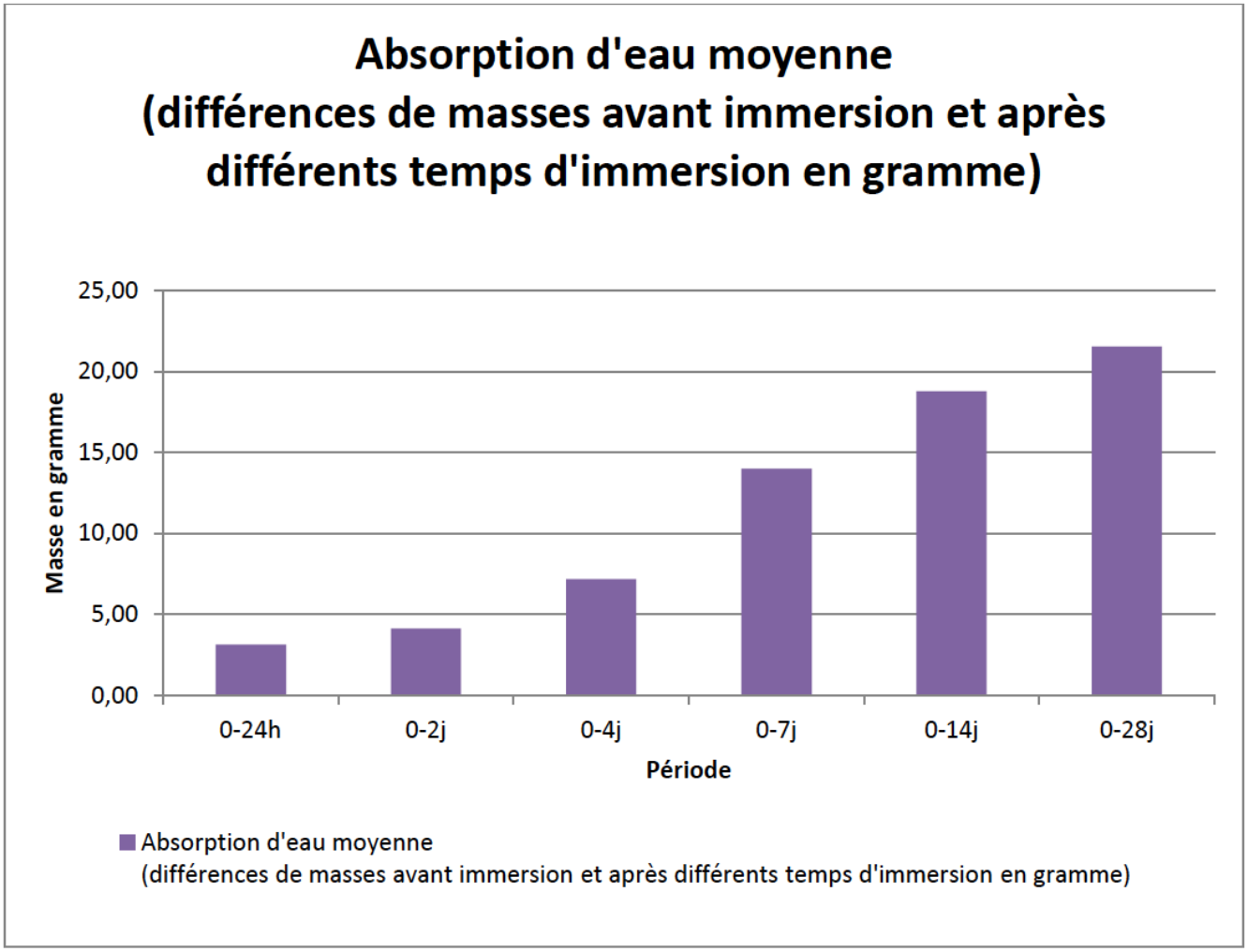


Figure 44 : Absorption d'eau moyenne par période de temps

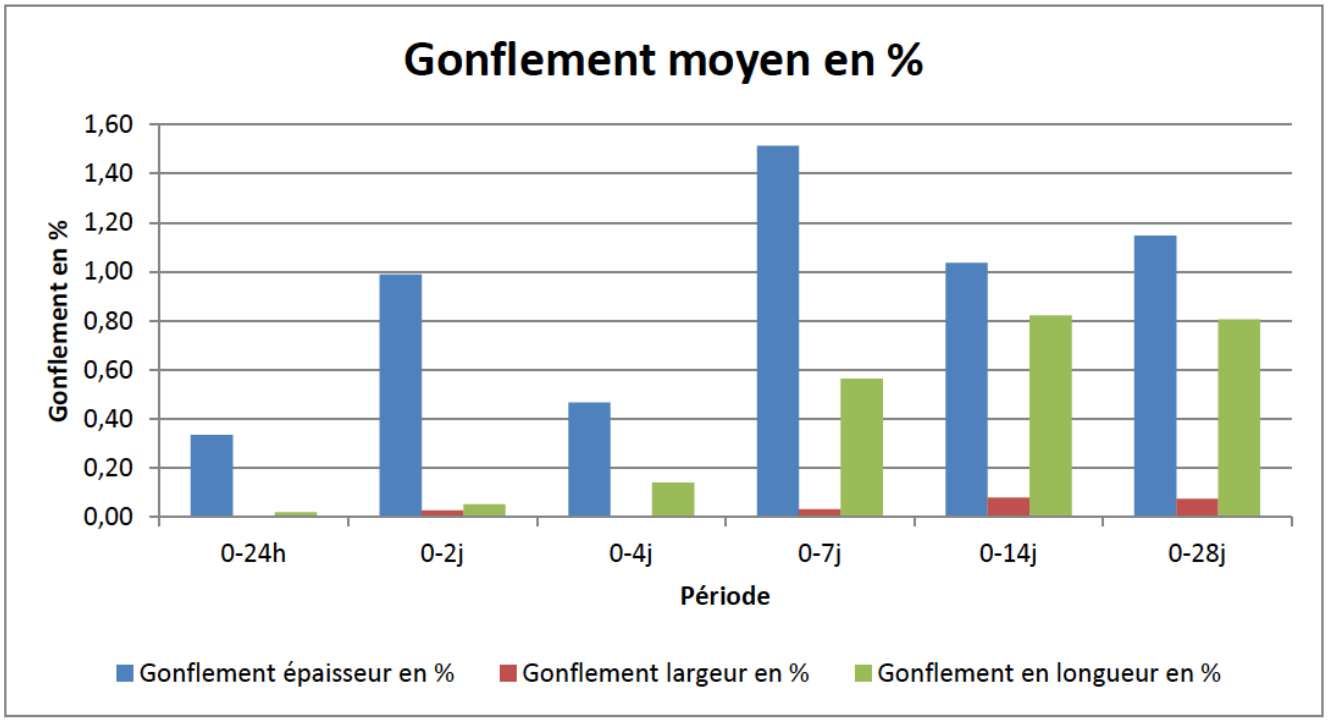


Figure 45 : Gonflements moyens par période de temps

Le gonflement en épaisseur est plus important que le gonflement en largeur et longueur, ceci s'explique par le plus faible dimensionnel de la cote en épaisseur comparée à celles en longueur et largeur.

Les éprouvettes peuvent absorber jusqu'à 20 g d'eau en 28 jours. La masse initiale des éprouvettes était d'environ 160 g, la masse après 28 jours est d'environ 180 g. Le graphique des absorptions moyennes (différences avant immersion et après plusieurs jours d'immersion) n'est pas stabilisé au bout de 28 jours, les lames pourraient encore reprendre de l'humidité en poursuivant le test.

2.5.4. Caractérisation de la stabilité dimensionnelle pour un profil de lame de terrasse

2.5.4.1. Présentation de l'essai

L'essai d'orientation est réalisé avec les conditions climatiques de la norme NF EN 1910 « Planchers et parquets en bois et lambris et bardages en bois – Détermination de la stabilité dimensionnelle – avril 2000 ».

Les éprouvettes sont conditionnées à 20°C, 65% HR puis exposées successivement à des conditions humides (20°C, 85% HR) puis à des conditions sèches (20°C, 30% HR). Les variations dimensionnelles sont mesurées après chaque conditionnement stabilisé, la variation cumulée relative est alors déterminée. 2 répétitions sont réalisées.

Les mesures sont effectuées au pied à coulisse numérique. Les conditionnements sont effectués dans une enceinte climatique.

Nombre d'éprouvettes : 9 éprouvettes pour un profil de lame de terrasse

Dimension des éprouvettes : 100 mm de longueur et la largeur et l'épaisseur réelles des produits, ici environ 20 mm d'épaisseur et 140 mm de largeur.

L'essai a débuté le 27/03/19 et s'est terminé le 25/04/19.

2.5.4.2. Présentation des résultats

Le Tableau 10 montre les résultats du 1er cycle :

	Gonflement épaisseur en %	Gonflement largeur en %	Gonflement en longueur en %	Absorption d'eau (différences de masses entre ambiance humide et ambiance sèche en gramme)
1	1,04	0,19	0,38	0,21
2	0,71	0,14	0,29	0,33
3	0,50	0,11	0,25	0,42
4	0,79	0,14	0,18	0,10
5	0,82	0,19	0,39	0,85
6	0,76	0,17	0,35	0,69
7	0,72	0,15	0,30	0,52
8	0,50	0,14	0,35	0,87
9	1,53	0,27	0,31	0,31
Moyenne	**0,82**	**0,17**	**0,31**	**0,48**

Tableau 10 : Variation dimensionnelle du profil de terrasse après le 1er cycle

Le Tableau 11 montre les résultats du 2nd cycle :

	Gonflement épaisseur en %	Gonflement largeur en %	Gonflement en longueur en %	Absorption d'eau (différences de masses entre ambiance humide et ambiance sèche en gramme)
1	1,06	0,23	0,45	0,25
2	1,04	0,18	0,34	0,34
3	0,54	0,14	0,33	0,50
4	0,80	0,21	0,21	0,17
5	0,91	0,28	0,45	0,90
6	0,83	0,25	0,39	0,78
7	0,78	0,19	0,33	0,55
8	0,58	0,17	0,39	0,92
9	1,56	0,36	0,35	0,35
Moyenne	**0,90**	**0,22**	**0,36**	**0,53**

Tableau 11 : Variation dimensionnelle du profil de terrasse après le 2nd cycle

Il y a peu de différence entre les valeurs du 1er cycle et les valeurs du 2ème cycle indiquant une reproductibilité du comportement.

Le gonflement en épaisseur est plus important que le gonflement en largeur et longueur comme constaté dans l'essai de gonflement par immersion totale (§ 2.5.3.2), pour les mêmes raisons : plus la cote mesurée est faible, plus la variation relative est importante.

Dans l'absolu, la stabilité dimensionnelle mesurée est conforme aux attentes.

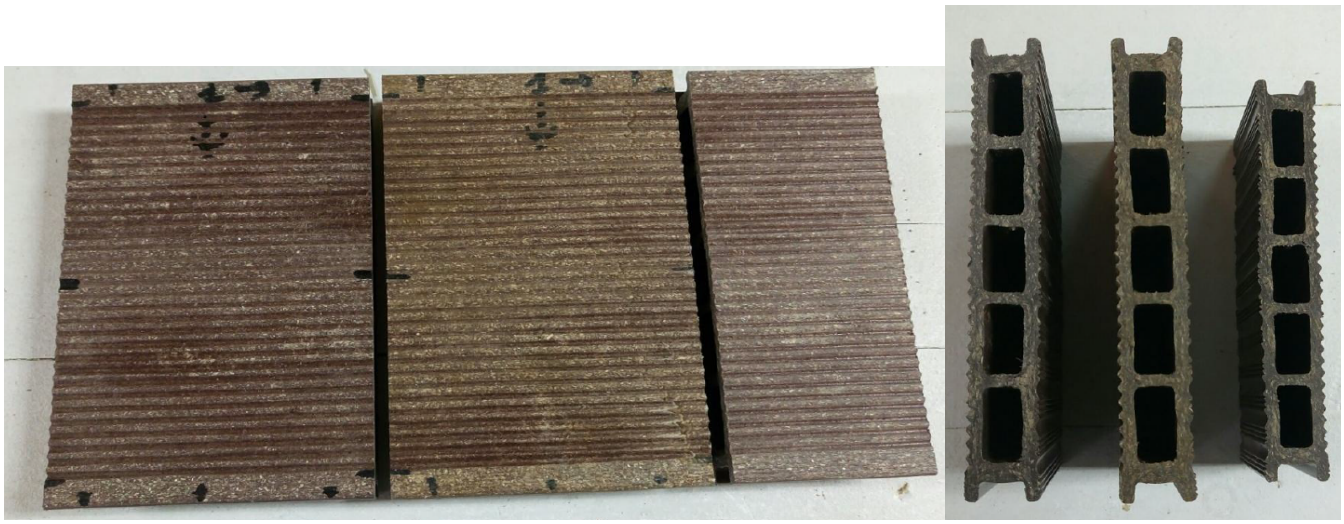


Figure 46 : Photos de face et de profil des échantillons testés en gonflement après essais de stabilité dimensionnelle (à g), de gonflement (au centre) et le témoin non testé à (d.)

L'aspect des échantillons vieillis est similaire à celui du témoin. On notera une coloration légèrement jaunâtre de l'échantillon immergé, cette couleur étant due à la coloration de l'eau stagnante de l'essai.

De profil, l'échantillon témoin parait beaucoup plus petit que les autres, ceci est dû à la perspective de la photo, le témoin étant plus court que les éprouvettes normalisées.

2.5.5. Caractérisation de la résistance aux termites souterrains

La caractérisation de la résistance aux termites souterrains a été réalisée par le laboratoire de biologie du FCBA en respectant les normes :

NF EN 15534-1+A1 : Composites à base de matières cellulosiques et de thermoplastiques (communément appelés composites bois-polymères (WPC) ou composites fibres d'origine naturelle (NFC)) - Partie 1 : Méthodes d'essai pour la caractérisation des compositions et des produits (janvier 2018).

Et,

NF EN 117 : Détermination du seuil d'efficacité contre les termites européens du genre Reticulitermes - méthode de laboratoire

C'est le dispositif d'essai de la norme NF EN 117 qui est utilisé. Les adaptations nécessaires pour l'utilisation du matériau WPC sont prises en charge par la norme NF EN 15534-1+A1. La référence interne de la méthode de caractérisation est : FCBA-BIO-E-043

Les échantillons de planche de terrasse ont été réceptionnés par le FCBA le 01/04/19 et ont été découpés par ce dernier en éprouvettes de 5 x 5 x 2 cm.

Le composite envoyé ne contenant pas de substance active destinée à se prémunir des attaques de termites, aucune date limite d'utilisation n'est applicable au matériau au regard de son comportement vis-à-vis des termites. Les conditions opératoires sont données dans le Tableau 12.

Précisions et dates relatives aux essais		
Espèce de termite utilisée		*Reticulitermes flavipes*
Lieu d'origine des termites		Saint-Trojan-les-Bains (Charente-Maritime)
Essence de bois utilisée pour la validation de l'essai (témoins)		Aubier de pin sylvestre
Échantillons	Nombre de témoins	3
	Nombre d'échantillons testés	6
	Examen	Visuel pour les cotations de dégâts Comptage manuel des termites vivants
Exposition	Épreuve d'usure	Aucune
	Date de mise en présence	16/05/2019
	Date de contrôle	11/07/2019

Tableau 12 : Conditions opératoires de l'essai de résistance aux termites

Les cotations des dégâts décrits dans la norme NF EN 117 s'appliquent au bois traité. Elles sont des combinaisons de mesures de « profondeurs d'attaques » et de « surfaces de dégradations » et s'échelonnent de « 0 », aucune trace d'attaque, à « 4 », attaque sévère.

Cette cotation peut s'appliquer au matériau testé.

Le matériau est déclaré résistant aux termites, si, sur les 6 répétitions, il n'y a que des cotations de « 0 » ou de « 1 », avec une seule cotation « 2 » acceptée.

	Référence	Nombre d'insectes vivants	Soldats (S) et nymphes (N)	Survie des ouvriers %	Cotation des dégâts de l'éprouvette
Eprouvettes **Témoins** pin sylvestre	**T$1**	156	N – S	**62**	**4**
	T$2	200	N – S	**80**	**4**
	T$3	173	N – S	**69**	**4**
PE60-4-DEA	**E1**	0	-	**0**	**1**
	E2	0	-	**0**	**1**
	E3	0	-	**0**	**2**
	E4	0	-	**0**	**1**
	E5	0	-	**0**	**1**
	E6	0	-	**0**	**0**

Tableau 13 : Résultats des essais

Selon la norme NF EN 117: « l'essai est valable si les 3 éprouvettes témoins de virulence présentent à l'examen visuel la note 4 et si les colonies correspondantes comprennent au moins 50 % de survivants. »

Au vu de ces critères, l'essai est considéré comme valide.

Dans les conditions de l'essai, au vu des cotations de dégâts observées et du critère de sensibilité adapté de la norme NF EN 117 (voir page précédente), le matériau PE60-4-DEA est considéré comme résistant aux termites souterrains européens du genre *Reticulitermes*.

2.6. Phase 4 : Analyses

2.6.1. Propriétés physico-chimiques

Comme présenté au §2.3.3, la matière WPC issue de DEA est techniquement équivalente à un WPC classique incorporant un taux de bois, des additifs et une nature de résine analogues (Tableau 6 : Résumé des propriétés mécaniques des matériaux développés).

Nous nous concentrerons dans cette partie à comparer les lames de terrasses alvéolaires produites au cours de cette étude à des productions industrielles commerciales. Ceci nous permettra de comparer le matériau en intégrant tous les paramètres liés à sa mise en forme.

Les principaux leaders de la lame de terrasse WPC à base de PEHD sont Silvadeck, Geolam, Lameo, Silverwood. Les données techniques précises sont rarement communiquées publiquement du fait de la difficulté pour l'utilisateur final de juger de grandeurs mécaniques telles qu'un module d'élasticité d'une part, et d'autre part, de la concurrence entre les acteurs. Afin de comparer les matériaux et non les profilés, il est important de trouver un témoin commercial caractérisé et présentant une géométrie analogue à nos lames expérimentales. Le meilleur référent est la lame XTRA de Laméo (www.lameo.fr).

Test	**Unité**	**Laméo XTRA**	**Notre lame d'essais PE60-4-DEA**
Composition		55% bois, 30% PEHD, **15% additifs**	60% bois, 31% PEHD, **9% additifs**
Densité	g/cm3	1,2	1,23
Poids	Kg/m	**2,9**	**1,6**
Module d'élasticité	MPa	2824	3233
Résistance à la flexion	MPa	19,9	22,9

Tableau 14 : Comparaison de notre lame expérimentale avec la lame Laméo XTRA

La comparaison des lames expérimentales et Laméo XTRA (Tableau 14) nous indique une formulation voisine (30% de PEHD pour 55-60% de bois). On notera toutefois une plus forte teneur en additifs.

La densité des matériaux est, sans surprise du fait de la composition analogue, identique.

Le poids des lames au mètre linéaire est toutefois très différent, variant du simple au double, notre planche étant 2 fois plus légère, c'est-à-dire comportant presque 2 fois moins de matière (densité égale et largeur et hauteur voisines). La différence se situe donc au niveau des épaisseurs de parois.

Malgré le déficit de matière, notre planche d'essai présente une plus grande rigidité (module en flexion accru de 14,5%) et une résistance à la flexion du profil augmentée de 15% également.

Notre lame d'essais présente donc des caractéristiques tout à fait comparables aux productions industrielles actuelles, démontrant ainsi la capacité des DEA à servir de source de fibres pour les WPC.

2.6.2. Etude économique

Note : Toutes les données économiques dépendant des fluctuations des cours des énergies, des couts de mains d'œuvre et des stratégies industrielles, les données suivantes doivent être considérées comme indicatives et ne constituent aucun engagement commercial.

Considérant les DEA comme une matière première analogue à celle de l'étude, à savoir un déchiqueta de panneaux de particules de bois et de MDF, nous distinguerons les étapes de broyage et de compoundage / extrusion.

Nous ne prendrons pas en compte la création de bâtiments et considérerons l'installation des lignes de production dans des bâtiments existants.

Nous considérerons des installations capables de produire 300kg/h de compound de WPC, c'est-à-dire une installation analogue à celle utilisée pour nos essais.

Avec un taux de bois de 60% en masse, la capacité correspondante de la ligne de broyage du bois doit être de 200kg/h.

Nous prendrons comme hypothèse de temps de travail opérationnel un fonctionnement en 3x8h 5 jours/semaine et 45 semaines/an et un taux d'utilisation de 80%.

Etape	Débit horaire	Capacité maxi en T (80% 3x8, 45sem/an)	Eq. Compound 60% bois (T)	CAPEX (€)	Installation (15% Capex)
Affinage bois	200	864	1440	305 000 €	45 750 €
Compoundage	300	1296		300 000 €	45 000 €
Extrusion 1	200	864		400 000 €	60 000 €
Extrusion 2	200	864		400 000 €	60 000 €
TOTAL				1 405 000 €	210 750 €
					1 615 750 €

Tableau 15 : Estimation des couts d'investissement machines

L'investissement global avec 2 lignes d'extrusion s'élève à 1,6 M€. La capacité limitante étant le compoundage avec 1296 T. Avec ce débit annuel et un amortissement des installations sur 7 ans, la part « Capex » représente 178€/T de WPC produit et extrudé en planche.

Etape	Débit horaire	Capacité maxi en T (80% 3x8, 45sem/an)	Eq. Compound 60% bois (T)	OPEX (€/T)
Affinage bois	200	864	1440	150 €
Compoundage	300	1296		240 €
Extrusion 1	200	864		960 €
Extrusion 2	200	864		
TOTAL				1350 €

Tableau 16 : Estimation des couts de fonctionnement des machines environnées

Le cout d'exploitation des lignes ramené à la tonne de planche extrudée atteint 1350 €.

Les couts des matières premières est estimé dans le Tableau 17 et atteint 1056€/tonne de compound.

Composant	Teneur (%)	Besoin annuel (T)	Cout (€/T)	Cout (€/T de WPC)
PEHD	30%	388,8	1 350 €	405 €
Bois déchiqueté trié	60%	777,6	500 €	300 €
Lubrifiant	3%	38,88	3 200 €	96 €
Agent de couplage	5%	64,8	3 100 €	155 €
Colorant	2%	25,92	5 000 €	100 €
TOTAL				1 056 €

Tableau 17 : Estimation des couts des matières premières

Ces données nous permettent d'estimer, avec l'hypothèse d'un bois DEA trié et déchiqueté à 500 €/T, un prix de la tonne de planche extrudée à 2584 €, soit ramené au mètre linéaire de notre planche

d'essais à 1,615 €/m, soit encore ramené au m^2 de terrasse un cout de production de 11,3 €/m^2. Ces données positionnerait le produit prototype de façon très compétitive sur le marché : un prix de vente autour de 30€/m^2 conférerait un positionnement prix attrayant et une marge d'exploitation et de distribution confortable.

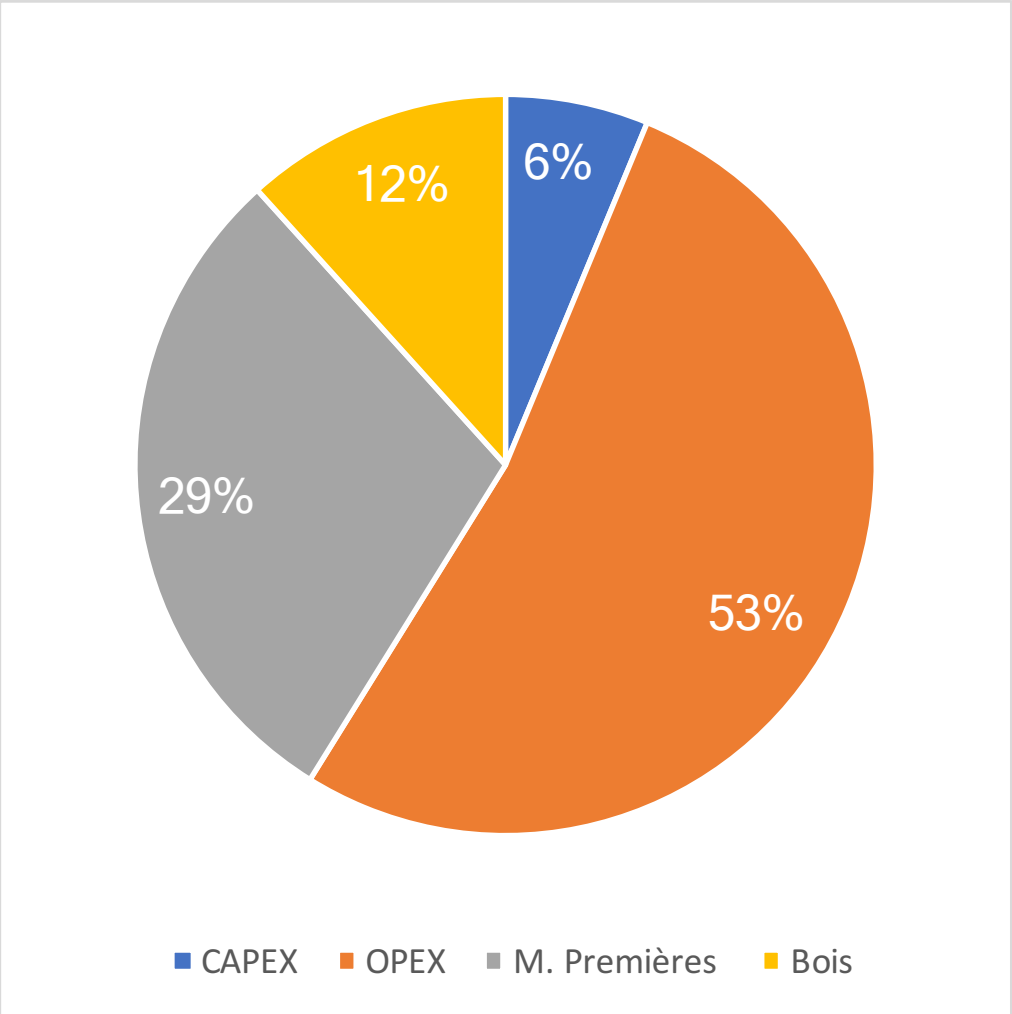


Figure 47 : Ventilation des coûts de production

Dans nos hypothèses, nous avons considéré un cout du bois de 500€/T, ce qui représente 12% du coût total de production (Figure 47). La part totale des matières premières s'élève à 41%.

Si on émet l'hypothèse de ne commercialiser que le compound à des extrudeurs, le cout de revient de cette matière serait alors de 1523 €/T, ce qui est environ le prix de marché, ne laissant donc pas de marge avec les données d'entrée de cette étude. Il sera alors judicieux dans ce cas de concevoir si la taille du marché le permet, une unité de forte capacité pour pouvoir négocier des prix de matières premières plus avantageux.

Si on émet par contre l'hypothèse de compounder en ligne la matière première avec l'extrusion des profilés, la rentabilité deviendrait alors très avantageuse passant de 2584 €/T de planche à 2292 €/T soit un gain de rentabilité de 11,3%.

2.6.3. Aspects environnementaux

Les WPC développés étant des matériaux thermoplastiques ils sont 100% recyclables (broyage des profilés en fin de vie et ré-extrusion en nouveaux profilés possible).

Dans notre étude nous avons utilisé des PEHD vierges, l'utilisation de PEHD recyclé est tout à fait possible, voire désormais courante dans le milieu du WPC.

Assurer la traçabilité du bois comme 100% recyclé issu de filières contrôlées permettra un impact positif comparé aux farines de bois aujourd'hui utilisées dans les productions étrangères notamment turques et chinoises dont la traçabilité des bois est très floue, en particulier au regard de la réglementation européenne RBUE (Réglementation Bois de l'Union Européenne).

3. Conclusions

Le déchiqueta de DEA reçu a pu être broyé finement au moyen de broyeur à impacts. Si le taux d'humidité et la granulométrie de la matière brute ont permis de conduire les essais de broyage avec succès, la pollution du lot par des pièces métalliques – vis, ressorts… Cf. Figure 5 – a rendu la réalisation de l'essai particulièrement dangereuse.

En vue d'une industrialisation de la valorisation matière des DEA broyés, il sera impératif de s'assurer d'une **absence totale** de particules métalliques dans les lots de matière première.

La farine de bois ex-DEA obtenue a pu être compoundée sous forme de bois composite (WPC) en réalisant 4 grades (types) de matières sous forme de granulés :

- 1 grade Extrusion sur base polyéthylène (PEHD) chargé à 60% en masse de DEA ;
- 1 grade Rotomoulage sur base polyéthylène (PEHD) chargé à 20% en masse de DEA ;
- 2 grades Injection-moulage sur base polypropylène (PP) chargés à 40% en masse de DEA (les deux grades différant de par la fluidité à chaud de la matrice polymère).

Les débits mesurés lors des différentes étapes réalisées (broyage, compoundage et micronisation) peuvent être relevés de l'ordre de 15 % dans le cas d'une exploitation en continu.

En comparaison avec les grades commerciaux actuels, ces matériaux intégrant les DEA broyés présentent des performances mécaniques analogues.

Concernant la mise en forme des matières, le rotomoulage s'avère très compliqué et économiquement difficilement viable à priori puisque le temps de cycle de production devrait être augmenter d'environ 50%. Le taux de charge en bois est limité à 20% en masse, ce qui tend à limiter considérablement l'intérêt de cette application pour les WPC à base de DEA. La chauffe importante des DEA au cours du procédé de mise en forme induit la génération d'odeurs très désagréables et très intenses.

A l'opposé, les essais d'injection moulage et d'extrusion se sont révélés particulièrement opportuns et satisfaisants. L'injection permet d'obtenir des pièces tridimensionnelles avec un aspect bois flatteur.

L'extrusion autorise la réalisation de profilés simples (profils pleins) mais également des profilés plus techniques (alvéolaires). La versatilité d'emploi de ces composites sera un argument à faire valoir dans la recherche d'investisseurs désireux de financer des unités de productions de ce type de matériaux/produits.

Les profilés ont été caractérisés et présentent des performances analogues aux productions commerciales comparables (profil voisin, nature de résine commune et taux de bois comparable).

Les composites obtenus se sont révélés résistants aux termites souterrains.

La reprise d'humidité des matériaux développés pourra être encore améliorée en séchant le bois lors de l'incorporation dans le composite.

L'ensemble des résultats et observations obtenus dans cette étude démontre la viabilité technique et économique de la valorisation des DEA dans la filière WPC, y compris pour la réalisation de platelage qui est pourtant un marché particulièrement concurrentiel.

Nous recommanderons donc de prendre contact avec des industriels actifs dans la filière extrusion moulage pour étudier avec eux leur sensibilité à utiliser ces matériaux, mais également, en cas de difficultés, de se rapprocher des producteurs actuels de WPC pour leur proposer uniquement la farine de bois DEA.

Bien que hors du cahier des charges initial, nous avons également montré la faisabilité de l'incorporation des DEA dans des composites injectables (injection moulage). Cette faculté peut considérer également une voie de valorisation des DEA complémentaire.